



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY**

**A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY**

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

**PREDIKCE DOSTAVOVÁNÍ HODNOTY**

**TLUSTOVRSTVÉHO REZISTORU**

PREDICTION OF RESISTIVITY FOR THICK FILM RESISTOR

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Jaroslav Kolařík

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. Josef Skácel

**BRNO 2017**



# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Mikroelektronika a technologie**

Ústav mikroelektroniky

**Student:** Jaroslav Kolařík

**ID:** 177546

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2016/17

## NÁZEV TÉMATU:

### **Predikce dostavování hodnoty tlustovrstvého rezistoru**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Proveďte rešerši v oblasti dostavování, resp. trimování, tlustovrstvých (TLV) odporů. Zaměřte se na konfiguraci řezu TLV resistorem z ohledem na vhodnost použití dané konfigurace pro různé aplikace (výkonová zatížitelnost, topné resistory,...). Pro ověření teoretických předpokladů použijte simulační program ANSYS Workbench. Ze získaných výsledků vytvořte testovací strukturu (výroba motivu, atd..) pro ověření výsledků simulací. Poslední částí je laserové trimování TLV resistorů a porovnání výsledků a vytvoření závěru z těchto poznatků.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

**Termín zadání:** 6.2.2017

**Termín odevzdání:** 8.6.2017

**Vedoucí práce:** Ing. Josef Skácel

**Konzultant:**

**doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.**  
předseda oborové rady

## UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## ABSTRAKT

Tato práce se zabývá problematikou tlustovrstvé technologie. Zejména je práce zaměřena na dostavování hodnoty odporu tlustovrstvého rezistoru. První část práce se zabývá vytvářením tlustých vrstev a problematikou tlustovrstvých rezistorů, technologií dostavování a druhy řezů. V další části je návrh tlustovrstvého rezistoru a testovacího substrátu s rezistory. Následuje popis výroby testovacího substrátu. Další část práce se zabývá praktickým vytvářením řezů do tlustovrstvých rezistorů zařízením AUREL ALS300. Následuje experimentální část, zabývající se simulací tlustovrstvých rezistorů s různými řezy v simulačním programu ANSYS Workbench. V poslední části je pro praktické ověření simulací měření termovizní kamerou FLIR SC660. V závěru jsou zhodnoceny zjištěné poznatky vlastností dostavovacích řezů.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Tlustovrstvá technologie, dostavování tlustovrstvého rezistoru, dostavovací řezy, proudová hustota, ANSYS Workbench, AUREL ALS300

## ABSTRACT

This work deals with issue the thick-film technology. Especially this work focuses on trimming value of resistance thick-film resistors. First part is dedicated to create the thick-film and thick-film resistors, trim technology and trim cuts. Next part is design of thick-film resistor and test substrate with resistors. The following is a description of the production the test substrate. Next part thesis deals with practical creation cuts into thick-film resistors by AUREL ALS300. The following is an experimental part dealing with the simulation of thick-film resistor with different trim cuts in the ANSYS Workbench. The last part is for practical verification of simulations measurement by the FLIR SC660 thermovision camera. At the end are evaluated knowledge of the properties of the trim cuts.

## KEYWORDS

Thick-film technology, trimming thick-film resistor, trim cuts, current density, ANSYS Workbench, AUREL ALS300

KOLAŘÍK, Jaroslav *Predikce dostavování hodnoty tlustovrstvého rezistoru*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav Mikroelektroniky, 2017. 70 s. Vedoucí práce byl Ing. Josef Skácel

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Predikce dostavování hodnoty tlustovrstvého rezistoru“ jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor(ka) uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil(a) autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl(a) nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom(a) následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autora(-ky)



## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu semestrálního projektu panu Ing. Josefu Skácelovi, za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno .....

.....

podpis autora(-ky)



Autor děkuje za zapůjčení vybavení z projektu ED0002/01/01 - NETME CENTRE a NETME CENTRE PLUS - Projekt LO1202, získaného za finanční podpory MŠMT v rámci programu NPU I.

# OBSAH

Úvod	9
<b>1 Tlustovrstvá technologie</b>	<b>10</b>
1.1 Substrát	10
1.2 Pasty pro tlustovrstvou technologii	11
1.2.1 Vodivá pasta	11
1.2.2 Odporová pasta	11
1.2.3 Dielektrická pasta	12
1.3 Nanášení past	12
1.3.1 Sítotisk (Screen printing)	12
1.3.2 Šablonový tisk (Stencil printing)	13
1.3.3 Tisk disperzerem (Dispensing printing)	14
1.3.4 Tisk proudu aerosolu (Aerosol Jet Printing)	15
<b>2 Tlustovrstvý rezistor</b>	<b>16</b>
2.1 Dostavování hodnoty rezistoru	17
2.1.1 Pískování (proudem abrazivních částic)	17
2.1.2 Laserem	18
2.2 AUREL ALS300	20
2.3 Typy řezů	21
2.3.1 I-řez (Straing cut)	21
2.3.2 L-řez (L-cut)	22
2.3.3 D-řez (Double cut)	22
2.3.4 L-řez s dostavovacím řezem (L-cut with Vernier cut)	23
2.3.5 M-řez (Serpentine cut)	24
2.3.6 Dvojitý obrácený řez (Double Reserve cut)	24
2.3.7 L-řezy naproti (Opposite L-cut)	25
2.3.8 U-řez (U-cut)	25
2.3.9 Holý řez (Shave cut)	26
2.3.10 Náhodné řezy (Random cut)	26
<b>3 Návrh testovacího substrátu</b>	<b>28</b>
3.1 Návrh tlustovrstvého rezistoru	28
3.1.1 Návrh těla tlustovrstvého rezistoru	28
3.1.2 Návrh vodivých plošek tlustovrstvého rezistoru	29
3.1.3 Výsledný tlustovrstvý rezistor	29
3.2 Návrh struktury testovacího substrátu	30

<b>4</b>	<b>Výroba testovacího substrátu</b>	<b>31</b>
4.1	Vytvoření filmových předloh . . . . .	31
4.2	Vytvoření motivu na síto . . . . .	31
4.3	Příprava past pro tisk . . . . .	33
4.4	Tisk past na substrát . . . . .	33
4.5	Výpal past . . . . .	34
<b>5</b>	<b>Dostavování laserem AUREL ALS300</b>	<b>36</b>
5.1	Postup při dostavování . . . . .	36
5.2	Nastavení parametrů laseru . . . . .	38
5.3	Vytváření řezů . . . . .	38
5.4	Chyba multimetru KEITHLEY . . . . .	46
<b>6</b>	<b>Simulace v ANSYS Workbench</b>	<b>47</b>
6.1	Data pro simulaci . . . . .	47
6.2	Nastavení simulace . . . . .	49
6.3	Predikce řezů . . . . .	50
6.4	Simulace vytvořených řezů zařízením AUREL . . . . .	58
<b>7</b>	<b>Měření termovizní kamerou</b>	<b>59</b>
<b>8</b>	<b>Závěr</b>	<b>63</b>
	<b>Literatura</b>	<b>64</b>
	<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>67</b>

# ÚVOD

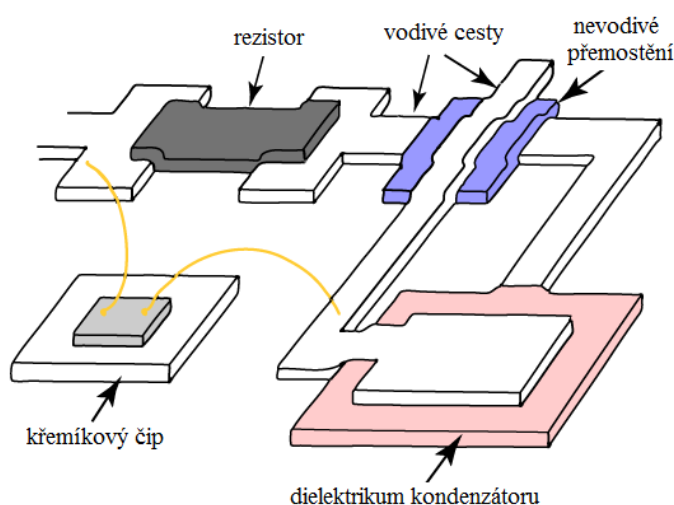
V současné době je snaha v elektronickém průmyslu vyvíjet co nejmenší elektronické obvody za co možná nejnížší náklady. Právě z hlediska miniaturizace a nákladů na výrobu je tlustovrstvá (TLV) technologie jednou z alternativ. TLV technologie byla vyvinuta již v šedesátých letech dvacátého století. Jelikož současně s vývojem TLV technologie začal i vývoj tenkovrstvé (TNV) technologie, byla dlouhou dobu TLV technologie právě ve stínu TNV technologie. V dnešní době už tomu tak ovšem není. Stále dochází k inovaci jednotlivých výrobních operací a použitých past, což vede k zlepšení elektických vlastností celého obvodu a součástek vytvořených TLV technologií.

Tato technologie vzniká nanášením past na substrát pomocí tiskových metod. Nejčastěji používanou metodou je sítotisk, kdy dochází k protlačení TLV pasty přes volné oka síta s motivem. Největším omezením při vytváření tlustých vrstev je poměrně malá rozlišovací schopnost, která se pohybuje maximálně okolo 100  $\mu\text{m}$ . Právě malá rozlišovací schopnost způsobuje velké odchylky při vytváření pasivních součástek TLV technologií. Například u TLV rezistorů se tato odchylka pohybuje v rozmezí  $\pm 20 \%$  od nominální hodnoty.

Aby bylo možné TLV rezistory používat i v přesných obvodech, je zapotřebí dostavení hodnoty odporu rezistoru. Dostavování se provádí vytvářením různých typů řezů do TLV pasty. Tyto řezy prodlužují dráhu proudu odporovým materiálem a tím dochází ke zvýšení odporu TLV rezistoru. Jako první technologie pro vytváření řezů se začalo používat tzv. pískování, tj. proud abrazivních částic, který odbrušuje odporový materiál. V současné době se používá YAG:Nd laser, kterým je odporový materiál odpařován a lze tímto způsobem dostavit odpor rezistoru až na 0,1 % od nominální hodnoty.

# 1 TLUSTOVRSTVÁ TECHNOLOGIE

Tlustovrstvá technologie vzniká nanášením past (např. vodivé, odporové, dielektrické) na substrát, který je z izolačního materiálu. Poté dochází k zasušení a vypálení nanesené pasty, jejíž výsledná tloušťka se pohybuje mezi 5 - 20  $\mu\text{m}$  [1]. TLV technologie se nejčastěji používá v hybridních integrovaných obvodech, kde se využívá kombinace TLV technologie s montáží diskrétních součástek. Další využití TLV technologie je při výrobě senzorů. Mezi hlavní výhody TLV technologie patří dlouhá životnost, tepelná odolnost a mechanická pevnost. Právě díky těmto vlastnostem a ekonomické efektivnosti a nenáročnosti si udržuje pevnou pozici při používání v elektronice. [2]



Obr. 1.1: TLV technologie [1]

## 1.1 Substrát

Jelikož TLV technologie se nejprve tiskne a poté vypaluje při vysoké teplotě okolo 600 - 1100  $^{\circ}\text{C}$  [3], musí mít použitý substrát výbornou tepelnou vodivost a mechanickou pevnost při vysokých teplotách. Dalšími požadavky na substrát jsou, aby povrch substrátu nebyl porézní a drsný. Tyto vlastnosti nejlépe splňují keramické substráty na bázi oxidu hlíku  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , oxidu berylia  $\text{BeO}$  nebo nitridu hliníku  $\text{AlN}$  [2]. Tloušťka substrátu se pohybuje v rozmezí od 0,25 mm do 2,00 mm, standartem ve výrobě je 0,63 mm [4]. Nejpoužívanějším substrátem pro TLV technologii je korundová keramika, jejíž základní složkou je oxid hlinitý  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Korundová keramika se vyrábí s 94 - 99,8% obsahem  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , přičemž zbylá procenta tvoří přísady pro zlepšení vlastností keramiky [5]. Rezistivita této keramiky dosahuje  $10^{12}$  -  $10^{13} \Omega \cdot \text{m}$  [6].

## 1.2 Pasty pro tlustovrstvou technologii

V TLV technologii se používají různé druhy past, které se vyznačují tixotropní vlastností, což znamená, že při vzrůstajícím mechanickém tlaku po určité době klesá jejich viskozita. Tyto pasty se dělí z hlediska elektrických vlastností na: **vodivé**, **odporové** a **dielektrické**. TLV pasty se skládají ze tří základních složek: **funkční**, **tavivové** a **pojivové**. [3, 7]

**Funkční složka** je tvořena částicemi (práškem), které určují elektrické vlastnosti pasty, zda budou plnit funkci vodivou, odporovou nebo dielektrickou. **Tavivová složka** je tvořena skleněnou fritou z nízkotavného skla, která vytváří vazby mezi funkční složkou a substrátem. **Pojivová složka** zajišťuje především tiskové vlastnosti pasty. Během sušení vrstvy, případně na začátku výpalu, se pojivová složka odpaří a nepodílí se na funkčnosti vrstvy. [7]

### 1.2.1 Vodivá pasta

Jedná se o pastu, pomocí které se vytváří síť vodivých cest a plošek pro pasivní prvky, případně diskrétní součástky viz Obr. 1.1. Funkční složku těchto past tvoří ušlechtilé kovy (např. Au, Ag, Pt, Pd, Pb) nebo jejich sloučeniny. Zlato se používá pro vysoce spolehlivé vodivé cesty nebo kontaktování. Čisté stříbro se vyznačuje nejnižším odporem. Z důvodů vysoké ceny čistých ušlechtilých kovů se používají spíše jejich sloučeniny (např. Pt-Au, Pt-Pd-Au, Pd-Ag, Pd-Pt-Ag) [8]. Velikost částic ušlechtilých kovů ve vodivých pastách je v rozmezí 0,5 - 1,0  $\mu\text{m}$ . [9]

### 1.2.2 Odporová pasta

Odporová pasta slouží k vytváření TLV rezistorů viz Obr. 1.1. Zde funkční složku tvoří oxidy ušlechtilých kovů. V současnosti se používají odporové pasty, kde funkční složku tvoří oxid ruthenium  $\text{RuO}_2$ , iridium  $\text{IrO}_2$  nebo rhenium  $\text{ReO}_2$ . Odporové pasty s těmito oxidy jsou méně citlivé na změny v teplotním profilu výpalu, poskytují lepší (nižší) teplotní koeficient odporu TCR a lepší výkonovou stabilitu odporu. [1]

Výrobci odporových past ve výrobních listech udávají při definované tloušťce odporové vrstvy tzv. **vrstvý odpor**, což je odpor na čverec, který se udává v jednotkách  $\Omega/\square$ . Tyto pasty se vyrábějí v dekadické odporové řadě (tzn. 1  $\Omega/\square$ , 10  $\Omega/\square$ , 100  $\Omega/\square$ ) v rozmezí od  $\text{m}\Omega/\square$  do  $\text{G}\Omega/\square$  [8]. Dalším důležitým elektrickým parametrem, který výrobci odporových past udávají je **plošné výkonové zatížení** v jednotkách  $\text{W}/\text{mm}^2$ . Odpor i výkonové zatížení je udáváno v jednotce na plochu, což dává velké možnosti při návrhu TLV rezistoru. [7]

### 1.2.3 Dielektrická pasta

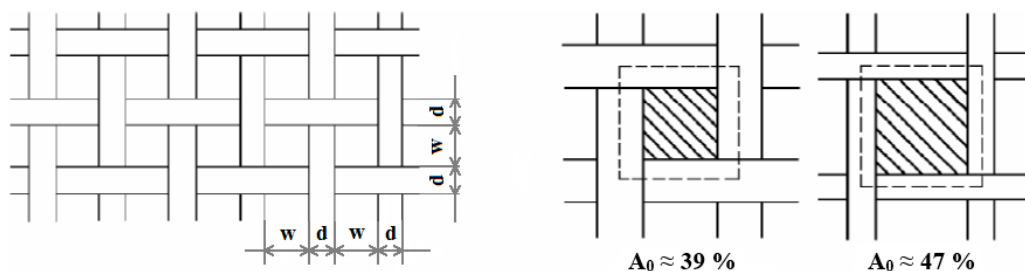
Dielektrické pasty se používají k vytváření nevodivých přemostění nebo kondenzátorů viz Obr. 1.1. Hlavní funkční složkou dielektrických past pro kondenzátory jsou keramické směsi  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$  nebo  $\text{MgO}$  [9]. Pasty, které se používají k vytvoření nevodivého přemostění, obsahují funkční složku ve formě skelných frit [7].

## 1.3 Nanášení past

Nanášení past patří k jedním z nejdůležitějších technologických procesů při vytváření tlustých vrstev. Jelikož výrobci past ve výrobních listech definují tloušťku vrstvy buď to po zasušení nebo výpalu, patří právě nanášení past k hlavním parametrům, které ovlivňují výslednou přesnost TLV pasivních prvků a kvalitu celého obvodu. Mezi hlavní metody nanášení past patří: **sítotisk**, **šablonový tisk**, **tisk disperzerem** a poměrně novou metodou je **tisk proudu aerosolu**.

### 1.3.1 Sítotisk (Screen printing)

Sítotisk je nejpoužívanějším technologickým způsobem pro nanášení TLV past. Základem této technologie je síto, které se skládá z **rámu** ve kterém je napnuta **sítovina**. Rám se v současné době vyrábí z hliníkových slitin, pro svou velmi dobrou pevnost při nízké hmotnosti a vlastnosti, kdy nedochází ke korozi oproti kovovým rámcům [10]. Sítovina se vyrábí z nerezové oceli nebo polyesteru. Základními parametry síťoviny jsou: světlost oka ( $w$ ), průměr vlákna ( $d$ ), otevřená plocha síťoviny ( $A_0$ ), tloušťka síťoviny ( $D$ ) a hustota ok na cm ( $n$ ). Hustota ok bývá také někdy udávána v jednotkách mesh, tedy ok na palec. [11]



Obr. 1.2: Základní parametry síťoviny [7]

Hustotu ok na cm síťoviny lze vypočítat pomocí vztahu:

$$n = \frac{10}{w + d} \quad [\text{ok}/\text{cm}; \text{mm}, \text{mm}] \quad (1.1)$$

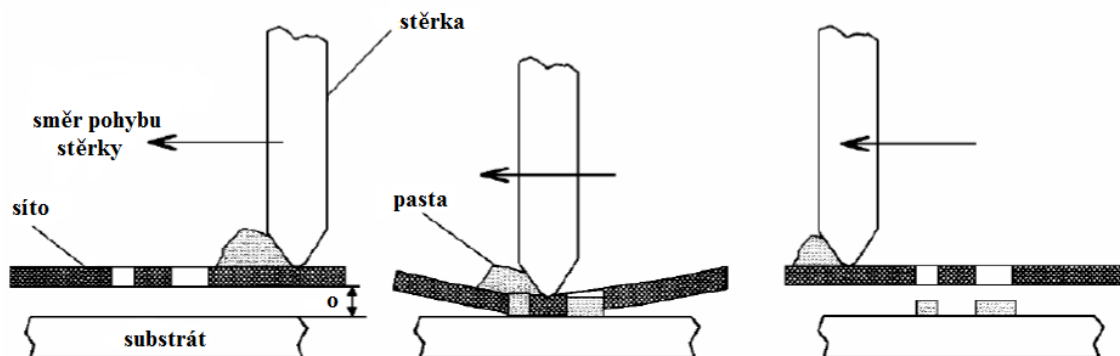


Pro otevřenou plochu síťoviny platí vztah:

$$A_0 = \frac{w^2}{(w + d)^2} \cdot 100 \quad [\%; mm, mm] \quad (1.2)$$

Aby bylo síto připraveno pro tisk pasty, je důležité zhotovení motivu na síto. Motiv na síto se vytváří pomocí fotorezistu, který může být buď to tekutý nebo suchý. Fotorezist se nanese na síto a následnou expozicí podle použitého fotorezistu (např. negativ - osvětlené částice se vytvrdí) dojde k jeho vytvrzení. Následně se na-exponovaný motiv vyvolá (např. negativ - nevytvrzené části se odplaví v lázni), a tak dojde k vytvoření sítotiskové šablony. [11]

Sítotisk je semi-kontaktní metodou, tedy síto je upevněno těsně nad substrát. Před stěrku na síto mimo motiv je nanесena pasta. Stěrkou se pohybuje od jednoho kraje síta k druhému, přičemž je síto přitisknuto k substrátu a následně odtrhnuto. Tak dochází k protlačení pasty přes volná oka síta a nanесení na substrát viz Obr. 1.3. Základními parametry sítotisku, které určují kvalitu natisknuté pasty jsou: tlak na stěrku ( $F$ ), rychlost stěrky ( $v$ ) a odtrh (snap-off), tedy vzdálenost síta od substrátu ( $o$ ). [2, 11]

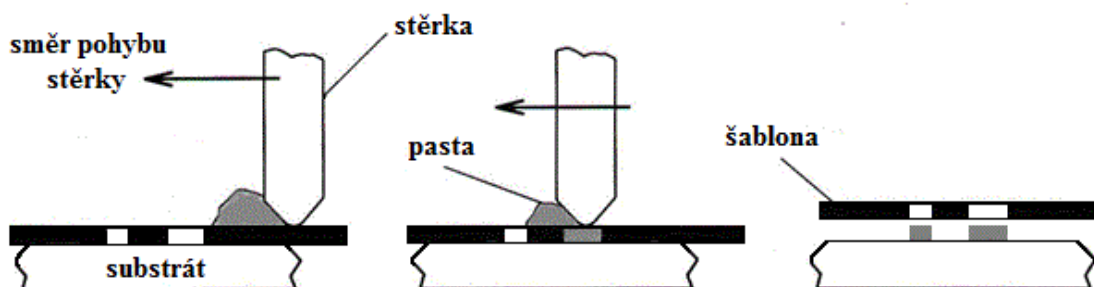


Obr. 1.3: Princip sítotisku [7]

### 1.3.2 Šablonový tisk (Stencil printing)

Šablonový tisk je obdobou sítotisku. Hlavní rozdíl je v provedení šablony pro tisk pasty. Šablona se vytváří pomocí laseru nebo procesem leptání do kovového materiálu. Kovový materiál je nejčastěji v podobě ocelové, bronzové nebo mosazové planžety. Při výrobě šablony musí být dodržen minimální rozměr apertury (otvoru), který musí být minimálně 1,5 násobek tloušťky materiálu. Dalším rozdílem je, že oproti sítotisku šablonový tisk je kontaktní metodou, tzn. šablona je v přímém kontaktu se substrátem po celou dobu tisku. [7, 11]

Tisk pasty probíhá obdobně jako u sítotisku, kdy je pasta nanášena před stěrku. Při pohybu stěrky je pasta nanášena přes apertury šablony na substrát. Po celou dobu tisku pasty je šablona ve stálém kontaktu se substrátem. Po ukončení pohybu stěrky a tedy po nanesení pasty přes všechny apertury, je důležité odtrhnutí šablony od substrátu. Odtrhnutí musí být dostatečně rychlé, aby se šablona dobře oddělila a zároveň nedošlo k rozmazání natisknuté pasty. [7, 11]



Obr. 1.4: Princip šablonového tisku [12]

### 1.3.3 Tisk disperzerem (Dispensing printing)

Princip nanášení pasty pomocí disperzeru spočívá v protlačení určitého množství pasty za časový interval nanášecí hlavou. Tato metoda se přímo při výrobě tlustých vrstev nepoužívá. Využití nachází spíše např. v HIO, kde se kombinuje TLV technologie s SMD součástkami, kdy na kontaktní plošky se nanáší pájecí pasta, aby mohlo dojít k zapájení SMD součástek. [11]

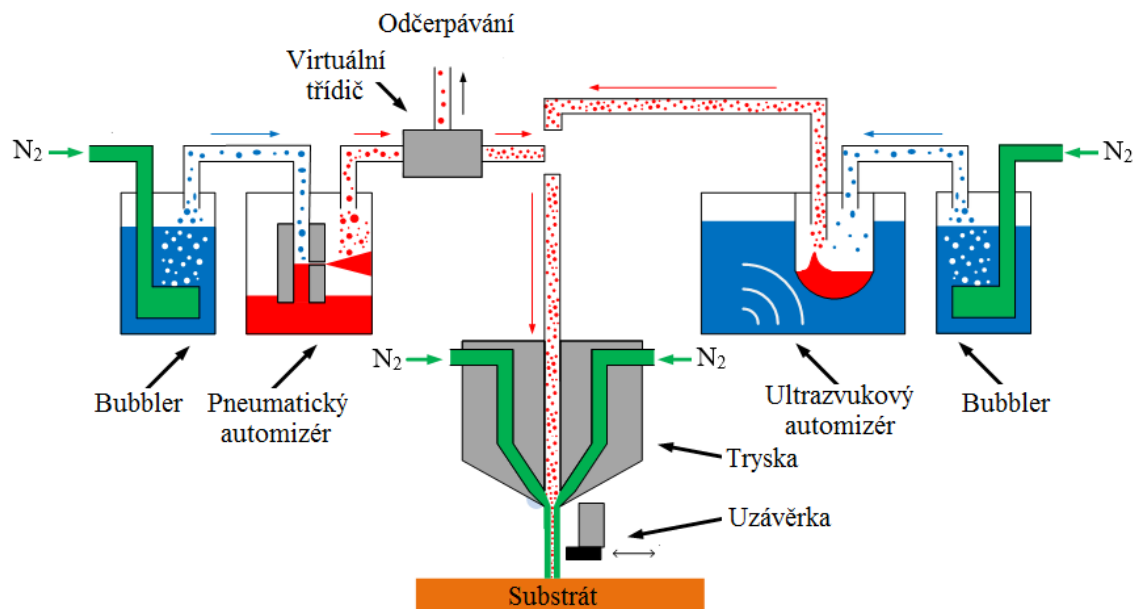


Obr. 1.5: Zařízení pro dispenzní tisk [13]

### 1.3.4 Tisk proudu aerosolu (Aerosol Jet Printing)

Jedná se o poměrně novou technologii pro vytváření tlustých vrstev na substrát. Tato technologie umožňuje tisk jemnějších struktur, miniaturizaci elektronických systémů a tisk na nerovinné povrchy. Tisk je zde řízen CAD daty, čímž odpadají další kroky při vytváření tlustých vrstev, které jsou zapotřebí u sítotisku, jako vytváření filmových předloh a motivů na síto. [14]

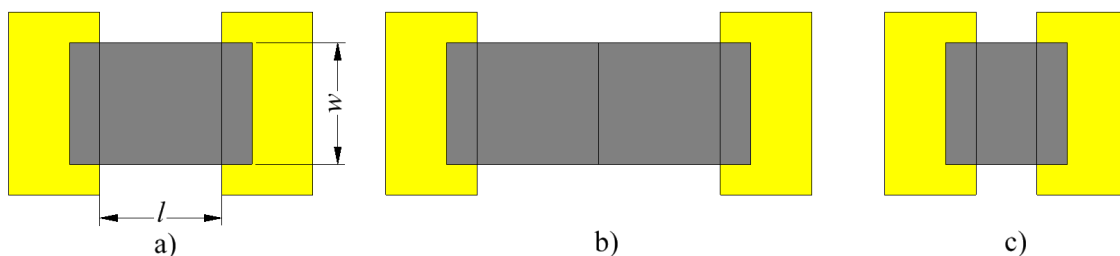
Na začátku celého systému je bubbler, který napomáhá k tvorbě aerosolu v automizéru přinesením kapiček rozpouštědla (např. isopropyl alkoholu, acetonu) do nanášeného materiálu. Automizér může být buďto pneumatický nebo ultrazvukový. U pneumatického automizéru dochází k vytváření aerosolu rozbíjením nanášeného materiálu o stěnu nádoby. Dále musí být vytvořený aerosol transportován do třídiče, kde dojde k odčerpání přebytečného dusíku a příliš velkých částí aerosolu, aby byl aerosol co nejhomogenější. Takto vytvořený aerosol může být transportován dále do tryskové tiskací hlavy. Ultrazvukový automizér vytváří aerosol rozbíjením nanášeného materiálu ultrazvukovými vlnami. Poté dochází k transportování aerosolu do tryskové tiskací hlavy. Zde je aerosol fokusován na substrát pomocí dusíku, který zároveň zajišťuje bezkontaktní průchod aerosolu tryskovou tiskací hlavou. Uzávěrka je mechanické zařízení, které slouží k velmi rychlému zastavení nanášeného aerosolu na substrát. [14]



Obr. 1.6: Princip funkce tisku proudu aerosolu [14]

## 2 TLUSTOVRSTVÝ REZISTOR

Výrobci odporových past udávají ve výrobních listech tzv. vrstvý odpor (odpor na čtverec), tzn. pokud je natisknuta odporová pasta  $10 \Omega/\square$  o délce ( $l$ ) 2 mm a šířce ( $w$ ) 2 mm, tedy jeden čtverec viz Obr. 2.1 a), je výsledný odpor této vrstvy po výpalu  $10 \Omega$ . Jako délka odporové pasty se uvažuje vzdálenost mezi kontaktními (vodivými) ploškami, přesah na vodivých ploškách se do délky odporové pasty nezapočítává. Výsledný odpor nezávisí na velikosti čtverce, tedy pokud je natisknuta odporová pasta 2 x 2 mm nebo 4 x 4 cm odpor rezistoru bude stále stejný. Pokud je stejná odporová pasta natisknuta s rozměry  $l = 4$  mm a  $w = 2$  mm znamená to, že jsou natisknuty dva čtverce zasebou viz Obr. 2.1 b), tedy výsledný odpor je dvojnásobný. Pokud je natisknuta odporová pasta s rozměry  $l = 1$  mm a  $w = 2$  mm, je natisknuta polovina čtverce viz Obr. 2.1 c) a výsledný odpor je poloviční. [1]



Obr. 2.1: Odpor na čtverec: a)  $R = 10 \Omega$  b)  $R = 20 \Omega$  c)  $R = 5 \Omega$

Odpor natisknuté odporové pasty při dodržení definované tloušťky ( $t$ ) udávané výrobcem, tedy závisí na poměru ( $A$ ) délky ( $l$ ) a šířky ( $w$ ) odporové pasty. Vztah pro výpočet odporu natisknuté odporové pasty vychází ze vzorce pro výpočet odporu vodiče o rezistivitě  $\rho$ , délce  $l$  a průřezu vodiče  $S$ : [7]

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} = \rho \cdot \frac{l}{w \cdot t} = R_{\square} \cdot \frac{l}{w} = R_{\square} \cdot A \quad (2.1)$$

Pro výpočet maximálního výkonového zatížení natisknuté odporové pasty, je důležité znát plochu natisknuté odporové pasty, která se vypočítá pomocí vzorce 2.2:

$$S_R = l \cdot w \quad [mm^2; mm, mm] \quad (2.2)$$

Pokud známe plochu natisknuté odporové pasty  $S_R$  a z výrobního listu výkonové zatížení  $P_{\square}$ , můžeme pomocí vzorce 2.3 vypočítat maximální výkonové zatížení rezistoru. [7]

$$S_R = \frac{P}{P_{\square}} \Rightarrow P = P_{\square} \cdot S_R \quad [W; W/mm^2, mm^2] \quad (2.3)$$

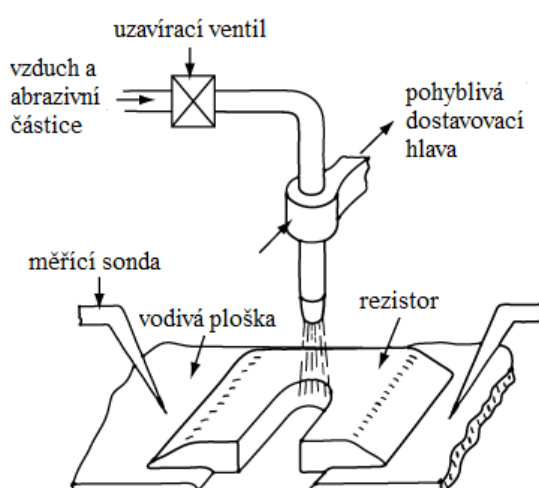
## 2.1 Dostavování hodnoty rezistoru

I když nejpoužívanější technologie pro tisk odporových past (sítotisk) je rychlá a finančně nenáročná metoda, má jednu nevýhodu a tou je přesnost natisknuté pasty. Z tohoto důvodu a z důvodu, kdy výrobce není schopen přesně definovat množství nanesené funkční složky v pastě při tisku, výrobci odporových past ve výrobních listech nezaručují hodnotu odporu vypálené odporové pasty přesnější než  $\pm 10 - 20 \%$ .

Pro zvýšení přesnosti odporu rezistorů se provádí tzv. dostavování (trimování, justování) rezistoru. Princip dostavování rezistoru spočívá v odebrání vypálené odporové pasty v podobě různých řezů pomocí **pískování (proudu abrazivních částic)** nebo **laseru** (CO<sub>2</sub> laser, YAG:Nd laser). Tyto řezy vytváří překážku průchodu proudu, čímž dochází k proudloužení dráhy proudu odporovým materiálem, a tím ke zvýšení odporu rezistoru. [1]

### 2.1.1 Pískování (proudem abrazivních částic)

Dostavování rezistoru pomocí pískování je prakticky první metodou, která se začala používat ve výrobě. Tato metoda je založena na proudu abrazivních částic nejčastěji z korundu nebo karbokorundu o průměru 10 - 50  $\mu\text{m}$ . Tyto částice jsou nesený proudem vzduchu přes trysku na substrát s vypálenou odporovou vrstvou viz Obr. 2.2. Tryskou (pohyblivou hlavou) se dá pohybovat pouze v osách x a y, vzdálenost od substrátu bývá fixní a to nejčastěji 635  $\mu\text{m}$ . Po dopadu abrazivních částic na povrch rezistoru dochází k odbrušování odporové pasty a při pohybu hlavy k vytváření řezů. Během celého procesu je současně měřen odpor rezistoru pomocí měřících sond. [15, 16]

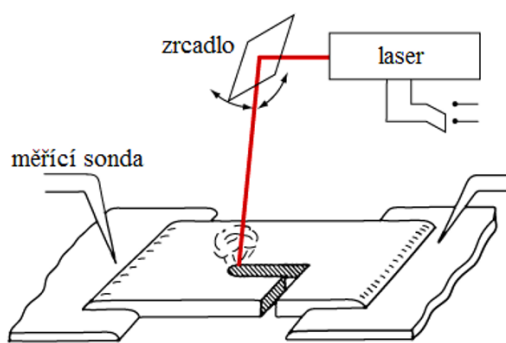


Obr. 2.2: Dostavování odporu rezistoru pomocí proudu abrazivních částic [1]

Touto metodou dostavování rezistoru lze dosáhnout šířky stopy řezu 100 - 180  $\mu\text{m}$ , vzhledem k použitému průměru trysky a velikosti abrazivních částic. Nevýhodou této metody je, že jde o prašnou metodu, kdy odbroušené částice odporové pasty při dostavování můžou zůstat na povrchu obvodu a mít tak negativní vliv na funkci a životnost obvodu. Další nevýhodou této technologie dostavování je velká šířka stopy řezu, která má vliv na výslednou přesnost odporu rezistoru. Vzhledem k těmto faktorům bylo později vyvinuto dostavování rezistoru pomocí laseru, proto se v dnešní době tato metoda dostavování využívá velmi zřídka. [15, 16]

### 2.1.2 Laserem

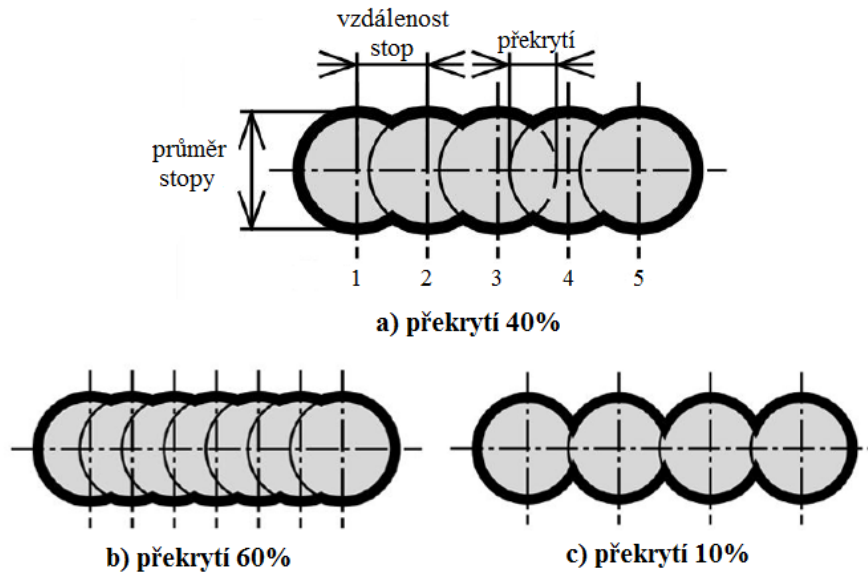
Dostavování odporu rezistoru laserem se provádí pomocí fokusovaného svazku světla, který je namířen na odporový materiál. Jelikož jsou lasery řízeny pulsně, dochází k odebírání odporového materiálu po částech. Během odebírání odporového materiálu je současně měřen odpor rezistoru pomocí měřících sond. Při delším působení a pohybu laseru je vytvářen řez ve vypálené odporové vrstvě viz Obr. 2.3. [15, 16]



Obr. 2.3: Dostavování pomocí laseru [1]

Pro dostavování odporu rezistoru se nejčastěji používají dva typy laserů: **CO<sub>2</sub> laser** nebo **YAG:Nd laser**. Výhodou YAG:Nd laseru je malá vlnová délka, díky které je nízká absorpce paprsku na keramickém substrátu, kdy dochází k odstranění především odporové pasty. CO<sub>2</sub> laser má velkou vlnovou délku z vysokou energií na puls, což může vést nejenom k odpaření odporové pasty, ale i narušení povrchu substrátu, proto se CO<sub>2</sub> laser používá spíše k nařezání (narýchování) keramických substrátů. Další výhodou YAG:Nd laseru je průměr stopy laserového paprsku, který může dosahovat hodnoty až 10  $\mu\text{m}$ . CO<sub>2</sub> laser má průměr paprsku 10x větší (100  $\mu\text{m}$ ) než YAG:Nd laser. Z výše uvedených důvodů je proto častěji používán k dostavování odporu rezistoru YAG:Nd laser. [15, 17]

**Parametry laseru:** Nastavení správných parametrů laseru pro dostavování odporu rezistoru je velmi důležité. Parametry musí být nastaveny tak, aby docházelo k vypařování odporového materiálu v celé tloušťce až na substrát a zároveň nedocházelo k poškození substrátu, vzniku povrchových cracků (prasklin) na povrchu substrátu. Mezi základní parametry, které se nastavují při dostavování rezistoru laserem patří: průměrný výkon  $P_p$  (average power), frekvence  $f$  (Q-rate), rychlost dostavování  $v_{dostav}$  (trim speed), průměr stopy paprsku  $d_{stopy}$  (spot size), vzdálenost stop paprsku  $l_{stopy}$  (bite size), překrytí  $p$  (overlap), energie na puls  $E_{puls}$  (energy per pulse) a hustota energie  $w$  (energy density). V závorce za jednotlivými parametry je uveden anglický název, který bývá častěji používán. [17]



Obr. 2.4: Základní parametry laseru s různým překrytím [17]

Vzdálenost stop paprsku laseru lze vypočítat pomocí rovnice 2.4. Tento parametr bývá nejčastěji udáván v  $\mu\text{m}$ . [17]

$$l_{stopy} = \frac{v_{dostav}}{f} \quad [\mu\text{m}] \quad (2.4)$$

Překrytí jednotlivých stop paprsků laseru je doporučeno volit nejméně 40 % viz Obr.2.4. Pro jemný řez bývá laser nastaven tak, aby překrytí jednotlivých stop paprsku bylo 60 % a více. Překrytí jednotlivých stop paprsku lze vypočítat pomocí rovnice 2.5 a je udáváno v procentech. [17]

$$p = \frac{d_{stopy} - l_{stopy}}{d_{stopy}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.5)$$



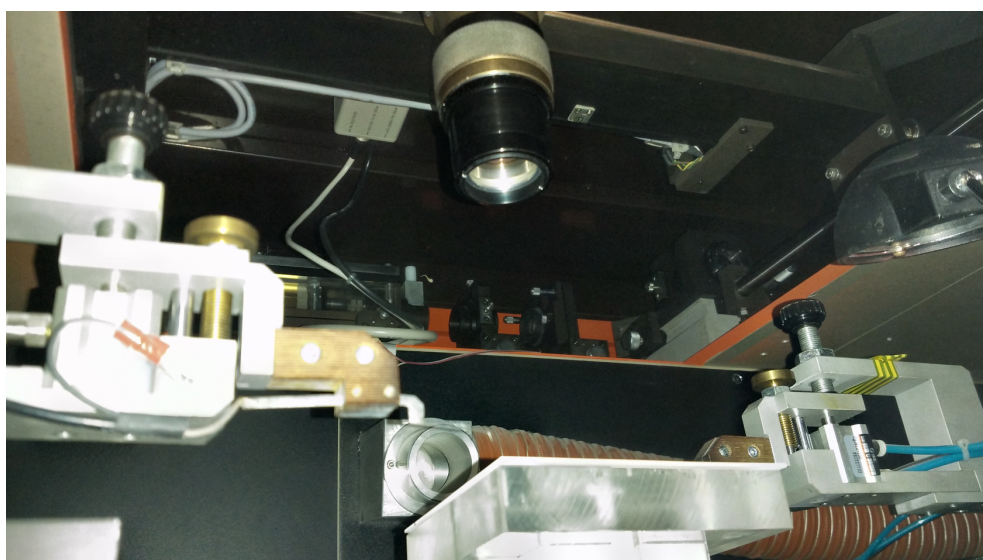
Energii na puls lze vypočítat pomocí rovnice 2.6 a hustotu energie pomocí rovnice 2.7. V hranatých závorkách za rovnicemi jsou uvedeny jednotky v kterých se nejčastěji tyto parametry udávají. [17]

$$E_{puls} = \frac{P_p}{f} \quad [mJ] \quad (2.6)$$

$$w = \frac{P_p}{v_{dostav} \cdot l_{stopy}} = \frac{P_p \cdot f}{v_{dostav}^2} \quad [J/mm^2] \quad (2.7)$$

## 2.2 AUREL ALS300

Zařízení AUREL ALS300 využívá výkonný YAG:Nd laser s výkonem svazku 5 W v kontinuálním režimu a 25 W v impulsním režimu. Toto zařízení je řízeno pomocí počítače s programem PROTOMAT. Zařízení obsahuje plochu s vývěvou, která slouží pro fixaci substrátu. Dále zařízení obsahuje CCD kameru, která umožňuje nastavení a sledování na monitoru místa, kde dochází k působení paprsku laseru. K dispozici jsou zde také dva motory, pro pohyb sond v osách x a y. Průměr stopy paprsku tohoto laseru je 40 - 60  $\mu m$ . Velkou předností tohoto zařízení je, že umožňuje nahrání gerber dat ve formátu RS-274X a tím plnou automatizaci procesu. Toto zařízení lze použít pro dostavování odporu TLV nebo polymerních rezistorů, pro výrobu kovových šablon a pro nařezání křemíkových substrátů. [18]



Obr. 2.5: Zařízení AUREL ALS300



## 2.3 Typy řezů

Pro nastavování odporu rezistorů se používají různé typy řezů z důvodů změny elektrických vlastností rezistoru při nastavování. Zásahem do struktury rezistoru (odporové pasty) se výrazně začnou měnit vlastnosti rezistoru, jelikož při průchodu proudu rezistorem, bude hustota proudu velmi nehomogenní. To má vliv např. na výkonové zatížení rezistoru, dlouhodobou stabilitu, TCR a další parametry, které jsou důležité pro použití rezistoru v obvodu. [19]

### 2.3.1 I-řez (Straing cut)

I-řez viz Obr. 2.6 je nejjednodušší a zároveň nejrychlejší řez, kterým se provádí nastavování rezistoru. Díky své jednoduchosti a rychlosti provedení patří z ekonomického hlediska k nejvýhodnějším řezům, ovšem za cenu menší přesnosti dostavení rezistoru. Maximální přesnost, s kterou lze rezistory dostavit, se pohybuje do  $\pm 0,50$  %. Menší nastavovací přesnost je způsobena exponencionálním růstem odporu s délkou prováděného řezu, tedy čím delší je řez, tím lze předpokládat menší nastavovací přesnost odporu rezistoru. Proto se tento řez používá v aplikacích, kde není kladen velký důraz na přesnost. [19, 20, 21]



Obr. 2.6: Řez I

**Provedení řezu:** Řez se umísťuje do prostřední třetiny délky rezistoru. Pro dosažení co největší změny odporu rezistoru se řez umísťuje přesně do poloviny délky rezistoru. Řez je prováděn v odporové vrstvě od jednoho okraje rezistoru k druhému okraji rezistoru. U tohoto řezu je doporučeno volit menší rychlost prováděného řezu, jelikož při delším řezu dochází k prudké změně odporu rezistoru a tak by mohlo snadno dojít k překročení nominální hodnoty odporu rezistoru. [19, 20]

### 2.3.2 L-řez (L-cut)

L-řez viz Obr. 2.7 vychází z I-řezu, ovšem je zde vyřešen problém exponenciálního růstu odporu rezistoru s délkou prováděného řezu. Tento řez patří k nejpoužívanějším řezům, vzhledem k rychlosti provedení a výsledné přesnosti rezistoru, která dosahuje až  $\pm 0,30 \%$  od nominální hodnoty rezistoru. Nevýhodou tohoto řezu je krátkodobá stabilita. [19, 20]



Obr. 2.7: Řez L

**Provedení řezu:** Začátek první části řezu se umísťuje do 15 - 20 % celkové délky rezistoru a provádí se stejně, jako I-řez od jednoho okraje rezistoru k druhému okraji rezistoru. Na první část řezu navazuje druhá část řezu, která je vedena kolmo k první části řezu, což zajišťuje menší změnu odporu s délkou řezu a téměř lineární růst odporu s délkou řezu. Díky těmto faktorům je u L-řezu docíleno větší přesnosti dostavení na nominální hodnotu. [19, 20]

### 2.3.3 D-řez (Double cut)

Dalším řezem, který do jisté míry lze předcházet exponenciálnímu růstu odporu rezistoru s délkou prováděného řezu, je D-řez viz Obr. 2.8. D-řez vychází z I-řezu, kde je přidán ve stínu prvního řezu druhý kratší řez. U tohoto řezu se dosahuje přesnosti  $\pm 0,20 \%$  od nominální hodnoty. D-řez je vhodný pro krátké rezistory, kde není použití L-řezu tak efektivní. Výhodou D-řezu je větší dlouhodobá stabilita než u L-řezu. [19, 20]



Obr. 2.8: Řez D

**Provedení řezu:** Dostavovací řezy se umísťují do prostřední třetiny délky rezistoru. Aby bylo docíleno požadovaného efektu, a to že se zabrání exponenciálnímu růstu odporu, musí být druhý řez vždy kratší než první. První (větší) řez je proveden stejně jako u I-řezu. Poté se provádí druhý (kratší) řez, který je ve stínu prvního řezu. Pro co nejlepší dostavovací výsledek by se měla délka druhého řezu pohybovat v 50 - 75 % délky prvního řezu. Při stejné délce prvního a druhého řezu rapidně stoupá hodnota odporu a může dojít k překročení nominální hodnoty. [19, 20]

#### 2.3.4 L-řez s dostavovacím řezem (L-cut with Vernier cut)

Tento typ řezu viz Obr. 2.9 se používá pokud chceme přesněji dostavit L-řez a zároveň docílit větší dlouhodobé stability než u L-řezu a D-řezu. Nevýhodou tohoto řezu je delší doba dostavování odporu rezistoru. [20]



Obr. 2.9: Řez L s dostavovacím řezem

**Provedení řezu:** První se provede L-řez. Druhý řez, pro jemnější dostavení se provádí kolmo k hustotě proudu před L-řezem tak, aby bylo zajištěno pomalé změny odporu rezistoru s délkou řezu. Druhý řez nesmí překročit profil L-řezu, jinak by nebylo docíleno požadovaného efektu. Druhým řezem jsme schopni dostavit 1-2 % od nominální hodnoty rezistoru. [20]

### 2.3.5 M-řez (Serpentine cut)

Pokud je zapotřebí docílit velké změny odporu rezistoru, je nejvhodnější M-řez viz Obr. 2.10. Pomocí tohoto řezu lze docílit až 20x větší hodnoty od počáteční hodnoty odporu rezistoru. Je to kombinace I-řezů, které jsou provedeny střídavě z obou stran. Tento typ řezu není použitelný u krátkých rezistorů. Nevýhodou je velmi malá dlouhodobá stabilita. [19, 20]



Obr. 2.10: Řez M

**Provedení řezu:** Řezy jsou prováděny kolmo k hustotě proudu střídavě z jedné a druhé strany. První a poslední řez by měl být umístěn nejblíže 0,25 mm od kontaktní plošky. Jednotlivé řezy by pak měli být u sebe nejblíže 0,35 mm a mezi všemi řezy by měla být dodržena stejná vzdálenost. [19, 20]

### 2.3.6 Dvojitý obrácený řez (Double Reserve cut)

Dvojitý obrácený řez se používá, pokud potřebujeme docílit velkou změnu odporu, ale nemáme k dispozici dostatečně dlouhý rezistor pro použití M-řezu. Nevýhodou tohoto řezu je malá přesnost dostavení rezistoru na nominální hodnotu a krátkodobá stabilita. [20]

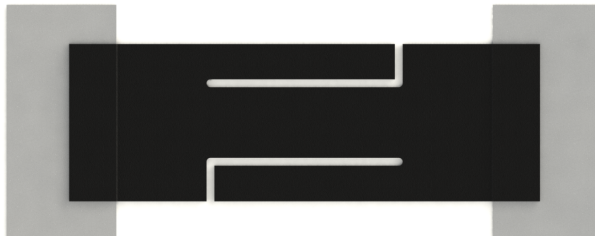


Obr. 2.11: Dvojitý obrácený řez

**Provedení řezu:** Dostavovací řezy se umísťují do prostřední třetiny délky těla rezistoru, aby bylo docíleno maximální změny odporu rezistoru. Jednotlivé řezy by měli být od sebe vzdáleny minimálně 0,35 - 0,50 mm. [20]

### 2.3.7 L-řezy naproti (Opposite L-cut)

Další způsob, kdy je možno docílit velké změny odporu vůči počáteční hodnotě jsou dva L-řezy naproti viz Obr. 2.12. Tímto řezem lze dostavit odpor rezistoru přesněji než M-řezem. Nevýhodou je, že otevřený L-řez nesplňuje požadavky Military Specification 883E. [21]



Obr. 2.12: Dvojtý obrácený řez L

**Provedení řezu:** Nejprve se provede první L-řez podle již výše zmíněného postupu. Poté se provede druhý L-řez, který je otočen o  $180^\circ$ . [21]

### 2.3.8 U-řez (U-cut)

U-řez je podobný L-řezu, prakticky jde o ukončený L-řez, díky čemuž je celá spodní část elektricky izolovaná viz Obr. 2.13. Z tohoto důvodu je tento typ řezu vhodný pro vysokonapěťové aplikace. Nevýhodou tohoto řezu je přesnost, která se pohybuje v  $\pm 1,0\%$  od nominální hodnoty, jelikož nejsme schopni určit k jaké změně odporu rezistoru dojde v poslední části řezu. [19]



Obr. 2.13: Řez U

**Provedení řezu:** První dvě části řezu jsou provedeny stejně, jako tomu bylo u klasického L-řezu. Poslední část řezu se provádí kolmo k hustotě proudu tak, aby došlo k uzavření L-řezu a tím k elektrickému izolování celé spodní části. [19]

### 2.3.9 Holý řez (Shave cut)

Pokud je požadována velká přesnost a dlouhá dlouhodobá stabilita používá se holý řez viz Obr. 2.14. Díky nízké změně odporu na délku je tento typ dostavování odporu velmi přesný až  $\pm 0,15\%$ . Ovšem dostavovací rychlost je oproti ostatním typům řezů velmi malá a závisí na délce rezistoru a potřebné změně odporu. Tento typ dostavování je vhodný pro aplikace s velmi vysokým napětím. [19, 20]

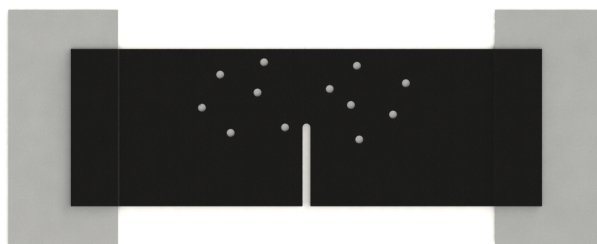


Obr. 2.14: Holý řez

**Provedení řezu:** Holý řez se vytváří postupným odebíráním odporového materiálu nejčastěji v celé délce rezistoru, aby při zátěži na něm byla co možná nejhomogennější proudová hustota. Odebírání materiálu začíná těsně před hranou rezistoru. Důležité je zvolit správný krok odebírání, aby se všechen materiál odebíral. Pro maximální stabilitu rezistoru se každý krok odebírání materiálu ukončuje až ve vodivých ploškách. [19, 20]

### 2.3.10 Náhodné řezy (Random cut)

Mezi spíše experimentální řez patří náhodné řezy. Používají se pokud počáteční hodnota odporu rezistoru je blízká nominální hodnotě a je zapotřebí jemné dostavení rezistoru. Tento typ dostavovacích řezů se používá často také s kombinací předcházejících řezů (I-řezy, L-řezy atd.) viz Obr. 2.15. Výhodou je velmi velká přesnost s jakou jsme schopni rezistor dostavit. Nevýhodou je experimentální dostavení, kdy nejsme schopni určit kam umístit řez, a také doba dostavení odporu rezistoru. [22]



Obr. 2.15: Náhodné řezy

**Provedení řezu:** Jde o spíše experimentální metodu, tedy žádný systém v rozmístování řezů není. Ovšem pokud je tento řez v kombinaci s např. I-řezem nebo L-řezem, náhodné řezy se umísťují mimo oblast provedení předchozích řezů kvůli většímu výkonovému zatížení rezistoru. [22]

## 3 NÁVRH TESTOVACÍHO SUBSTRÁTU

Tato část práce se zabývá návrhem rozměrů TLV rezistoru a návrhem testovací struktury substrátu, na kterou budou vytvořeny tyto rezistory.

### 3.1 Návrh tlustovrstvého rezistoru

Navrhován byl rezistor tak, aby ho bylo možno dostavit na hodnotu  $3\text{ k}\Omega$ . Rezistor bude obsahovat dvě vodivé plošky (z vodivá pasty), mezi kterými bude vytvořeno tělo rezistoru (z odporové pasty). Vodivé plošky budou zajišťovat vytvoření co nejhomogenějšího napěťového a proudového pole v odporové vrstvě rezistoru během přiloženého napětí (resp. proudu). Při návrhu TLV rezistoru byla dodržena návrhová pravidla pro TLV technologii (viz.[23]).

#### 3.1.1 Návrh těla tlustovrstvého rezistoru

Při výrobě testovací struktury na substrát bude použita odporová pasta Tesla Lanškroun TT5031, jejíž odpor na čtverec  $R_{\square} = 1\text{ k}\Omega/\square$  byl uveden na kelímku od této pasty. Výkonové zatížení na kelímku od odporové pasty nebylo uvedeno a výrobní list dané odporové pasty nebyl k dispozici. Vzhledem ke známým parametrům pasty bylo navrhováno tělo rezistoru.

Jelikož bude rezistor dostavován, musí být hodnota odporu rezistoru menší o 20 % oproti nominální hodnotě:

$$R_{TRIM} = 0,8 \cdot 3 \cdot 10^3 = 2,4\text{ k}\Omega \quad (3.1)$$

Vyjádření délky rezistoru (vzdálenosti mezi vodivými ploškami, kde bude natisknuta odporová pasta) ze vzorce pro výpočet odporu rezistoru:

$$R_{TRIM} = R_{\square} \cdot \frac{l}{w} \Rightarrow l = \frac{R_{TRIM}}{R_{\square}} \cdot w = \frac{2,4 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^3} \cdot w = 2,4 \cdot w \quad (3.2)$$

Vzhledem k tomu, že nebylo známo výkonové zatížení odporové pasty a vzhledem k návrhovým pravidlům TLV rezistoru, kdy standardní šířka i délka odporové pasty bývá 30 mils (0,762 mm) [23], byla zvolena šířka odporové pasty 1 mm. Délka odporové pasty ze vzorce 3.2 pak bude:

$$l = 2,4 \cdot w = 2,4 \cdot 1 = 2,4\text{ mm} \quad (3.3)$$

Přesah odporové pasty na vodivých ploškách byl zvolen 0,3 mm.



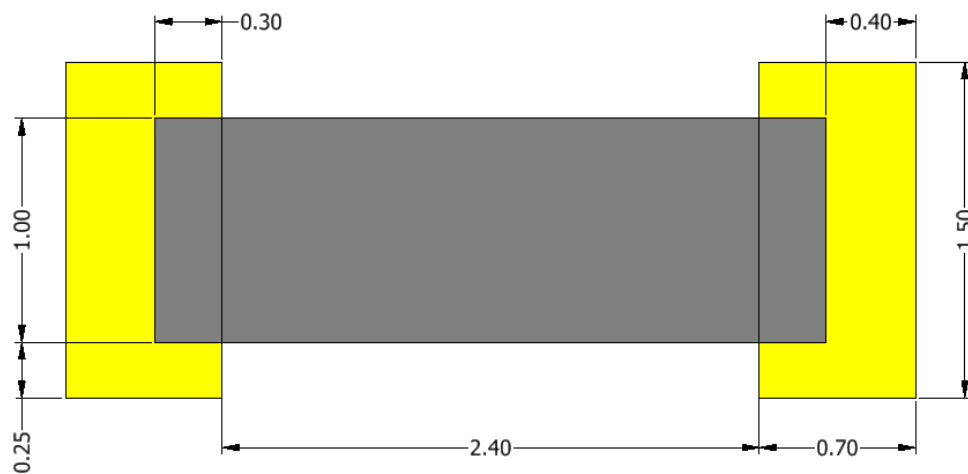
### 3.1.2 Návrh vodivých plošek tlustovrstvého rezistoru

Velikost vodivých plošek byla zvolena větší oproti standardu návrhových pravidel (viz [23]) vzhledem k jednoduššímu umístění měřících hrotů při dostavování rezistoru. Šířka vodivé plošky byla zvolena 1,5 mm a délka 0,7 mm viz Obr. 3.1. Při výrobě testovacího substrátu bude použita vodivá pasta ESL 9912-A. Výrobce této pasty udává ve výrobním listu vrstvý odpor  $R_{\square} < 3 \text{ m}\Omega/\square$  [25]. Při výpočtu odporu vodivé plošky byla uvažována mezní hodnota odporu na čtverec, tedy vrstvý odpor  $R_{\square} = 3 \text{ m}\Omega/\square$ . Odpor vodivé plošky pak bude:

$$R_{VP} = R_{\square} \cdot \frac{l}{w} = 3 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{0,7 \cdot 10^{-3}}{1,5 \cdot 10^{-3}} = 1,4 \text{ m}\Omega \quad (3.4)$$

### 3.1.3 Výsledný tlustovrstvý rezistor

Na obr. 3.1 je okótován navrhnutý TLV rezistor. Rezistor s těmito rozměry byl vyroben na testovací substrát a taktéž byl vytvořen 3D model tohoto rezistoru v programu pro 3D návrhy Autodesk Inventor Professional 2017. Tento 3D model byl použit dále v simulačním programu ANSYS Workbench 17.0.



Obr. 3.1: Rozměry TLV rezistoru v milimetrech

## 3.2 Návrh struktury testovacího substrátu

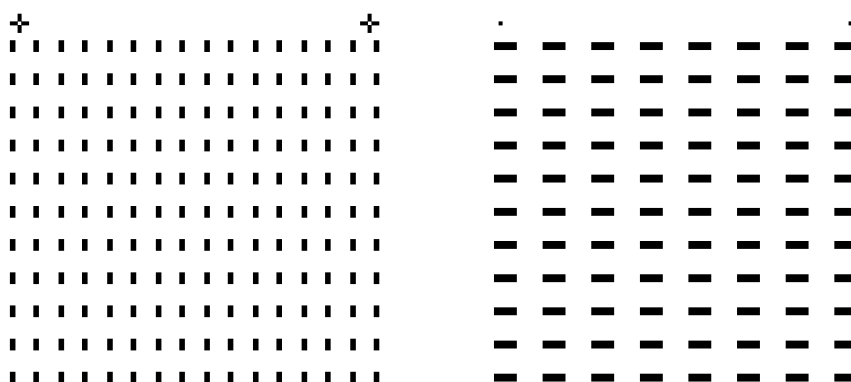
Struktura testovacího substrátu byla navrhována na substrát z korundové keramiky o rozměrech 2 x 2 palce (50,8 x 50,8 mm) a tloušťce substrátu 0,63 mm, který bude použit při výrobě. Struktura substrátu bude obsahovat osm řad po jedenácti rezistorech, z čehož šest řad bude použito pro vytvoření šesti různých řezů (I-řez, L-řez, L-řez s dostavovacím řezem, D-řez, dvojitý obrácený řez a U-řez) a zbylé řady budou použity pro nastavení parametrů laseru před dostavováním rezistorů, aby docházelo k vypařování odporové vrstvy v celé tloušťce, řez byl dostatečně jemný a zároveň nedocházelo k poškození substrátu. Struktura testovacího substrátu bude také obsahovat dvě soutiskové značky v horní části substrátu pro správné sesouhlasení motivů při tisku past.

## 4 VÝROBA TESTOVACÍHO SUBSTRÁTU

Při výrobě testovacího substrátu s TLV rezistory pro následné dostavování rezistorů laserem bylo zapotřebí dodržet několik výrobních procesů daných přesně zasebou. Tyto výrobní procesy budou popsány v této kapitole.

### 4.1 Vytvoření filmových předloh

Filmové předlohy, které byly zapotřebí pro vytvoření motivu pro vodivou a odporovou pastu na síto, byli vytvořeny v Eaglu 7.4 viz Obr. 4.1. Tyto vytvořené filmové předlohy byli exportovány z Eaglu do souboru ve formátu pdf a odeslány do firmy G5 - studio, kde byli vyrobeny pozitivní i negativní filmové předlohy.



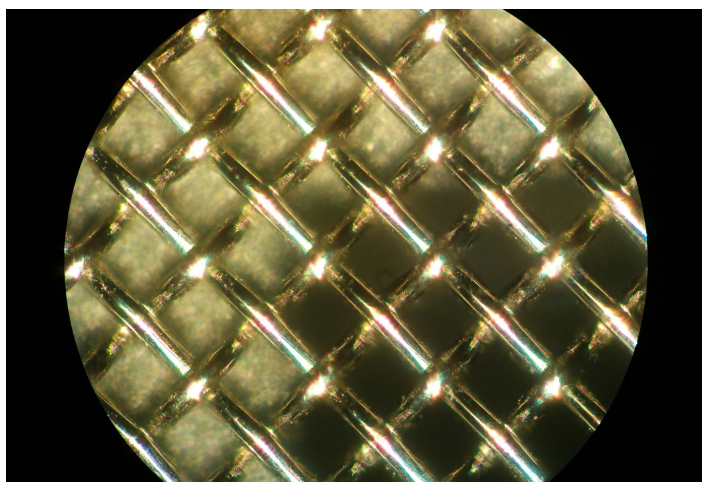
Obr. 4.1: Filmová předloha pro vodivou pastu (vlevo) a odporovou pastu (vpravo)

### 4.2 Vytvoření motivu na síto

Jelikož pro výrobu sítotiskových šablon byli použity školní síta pro výuku, bylo zapotřebí nejprve odstranit ze síta motiv, který byl na síto vytvořen již dříve. K tomu byl použit přípravek CPS Stencil Remover, který byl naředěn s vodou 1:25 a následně štětcem nanášen na povrch síta z obou stran. Po precizním nanesení tohoto přípravku na síto, kdy už docházelo k uvolňování fotorezistu ze síta, bylo síto vloženo do ultrazvukové mičky TESLA UC 002 BM1, kde byl fotorezist důkladně vymyt ze sítoviny. Po očištění síta byl použit přípravek pro odmaštění a zlepšení smáčivosti síta CPS Degreaser, který byl zředěn s vodou 1:25 a následně nanášen štětcem na obě strany síta. Po nanesení se nechal CPS Degreaser chvíli působit a poté bylo

síto opláchnuto vodou z pistole. Jakmile bylo síto suché mohl se vytvářet požadovaný motiv na síto. Tímto způsobem byli zbaveny dvě síta motivu, síto se síťovinou s polyesteru pro odporový motiv a síto se síťovinou s nerez oceli pro vodivý motiv.

Jelikož dále se pracovalo s fotorezistem, musely být všechny následující operace prováděny v temné komoře při žlutém osvětlení. Nejprve bylo do nádoby s destilovanou vodou ponořeno síto, které bylo následně pomaličku vytahováno tak, aby v okách síťoviny zůstávala voda. Poté byla vizuálně zkontrolována rovnoměrnost smočení síta a síto bylo položeno na podložku tak, aby přebytečná voda stekla ze síta. K výrobě sítotiskové šablony byl použit negativní suchý fotorezist Capillex CP, který byl nanesen doprostřed síta. Fotorezist musel být nanesen ochranou fólií vzhůru, aby bylo možné její odstranění před expozicí. Po nanesení fotorezistu byla z opačné strany síta, než byl nanesen fotorezist, stěrkou setřena přebytečná voda. Poté byl fotorezist sušen pomocí fénu studeným vzduchem (teplým vzduchem by mohlo dojít k vytvrzení fotorezistu). Jakmile byl dukladně suchý fotorezist, byla sloupnuta ochranná fólie. Expozice fotorezistu byla provedena zařízením s UV lampou CIMA ZIMERMANN ZLÍN. Do tohoto zařízení byla vložena pozitivní filmová předloha (buď to pro vodivou pastu nebo pro odporovou pastu), na kterou bylo položeno síto s naneseným fotorezistem. Poté bylo přiklopeno víko od zařízení pro expozici a odsán vzduch z prostoru, kde bylo síto s filmovou předlohou, aby během expozice nedošlo k posunutím filmové předlohy nebo síta. Poté bylo odstraněno stínění UV lampy a po dobu 45 sekund byl fotorezist přes filmovou předlohu vystaven záření z UV lampy. Po expozici bylo provedeno vyvolání motivu na síto ve vodní lázni, kdy neosvětlené části fotorezistu byli vyplaveny. Po důkladném vyvolání (odstranění nevytvrzeného fotorezistu) bylo síto sušeno. Suché síto s vytvořeným motivem poté bylo připraveno na tisk pasty.



Obr. 4.2: Detail síta s vytvořeným motivem pod mikroskopem JENAVERT

### 4.3 Příprava past pro tisk

Jako odporová pasta byla použita pasta od firmy Tesla Lanškroun s označením TT5031 s date výroby 18.1.1990 a odporem na čtverec  $R_{\square} = 1 \text{ k}\Omega/\square$ . Pro vodivé plošky byla použita vodivá pasta ESL s označením 9912-A s datem výroby 2.10.2014. Tyto pasty byly před použitím vyjmuty z chladícího boxu a temperovány na pokojovou teplotu. Po temperování byly pasty rozpracovány (rozmíchány), aby měli správnou viskozitu pro tisk. Jelikož byla použita odporová pasta z roku 1990, bylo zapotřebí do pasty přidat terpineol pro zlepšení tixotropních vlastností pasty. Takto připravené pasty pak byly připraveny na tisk.



Obr. 4.3: Použité pasty pro sítotisk

### 4.4 Tisk past na substrát

Jelikož první byla tisknuta vodivá pasta, síto s vytvořeným vodivým motivem bylo upevněno do poloautomatického sítotiskového zařízení Aurel C880. Poté byla vysunuta podložka, na kterou byl položen substrát z korundové keramiky s 96% obsahem  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Zapnutím vývěvy byl substrát fixován, aby během tisku nedošlo k jeho pohybu. Poté byla podložka s fixovaným substrátem umístěna pod síto s motivem a pomocí mikroposuvů byl sesouhlasen substrát s motivem vytvořeným na sítu. Parametry tisku jako např. odtrh, tlak těrky a rychlost těrky byly nastaveny podle zkušeností vedoucího bakalářské práce. Po nastavení parametrů tisku poloautomatického sítotiskového zařízení byla na síto mimo motiv nanесena rozpracovaná vodivá pasta. Pomocí tlačítka start byl zařízením automaticky provedl tisk pasty. Po tisku pasty byla podložka s fixovaným substrátem vysunuta a po vypnutí vývěvy

byl vyjmut substrát s natisknutými vodivými ploškami. Poté následoval 10 minut tzv. leveling (vyrovnání vrstvy pasty). Po uplynutí této doby byl motiv natisknuté vodivé pasty sušen v zařízení Memert UF 75 Plus po dobu 15 minut při teplotě 125 °C. Po zasušení vodivé pasty byl obdobným způsobem proveden tisk rozpracované odporové pasty. Nejprve byla vyměněna sítotisková šablona s vodivým motivem za sítotiskovou šablonu s odporovým motivem. Poté byl proveden tisk pasty s následným levelingem a zasušením odporové pasty. Takto bylo vytvořeno pět substrátů s odporovým polem, kdy byl nejlépe natisknutý substrát použit jako testovací pro dostavování TLV rezistorů řezy.

## 4.5 Výpal past

Po natisknutí a zasušení past byl proveden výpal past v zařízení BTU BUCR-1 po dobu 60 minut. Teplota žárového pásma byla nastavena na 850 °C po dobu 10 minut. Stejným způsobem byl proveden výpal past i na dalších čtyřech substrátech. Rezistory po výpalu na nejlépe vytvořeném substrátu dosahovali hodnot v rozmezí 6,3 - 7,8 k $\Omega$ , což mohlo být způsobeno stářím odporové pasty a ředěním s terpineolem, použitým sítem, které už nemuselo mít tak napnutou síťovinu, nastavením parametrů při sítotisku (odtrh, rychlost těrky, tlak těrky).

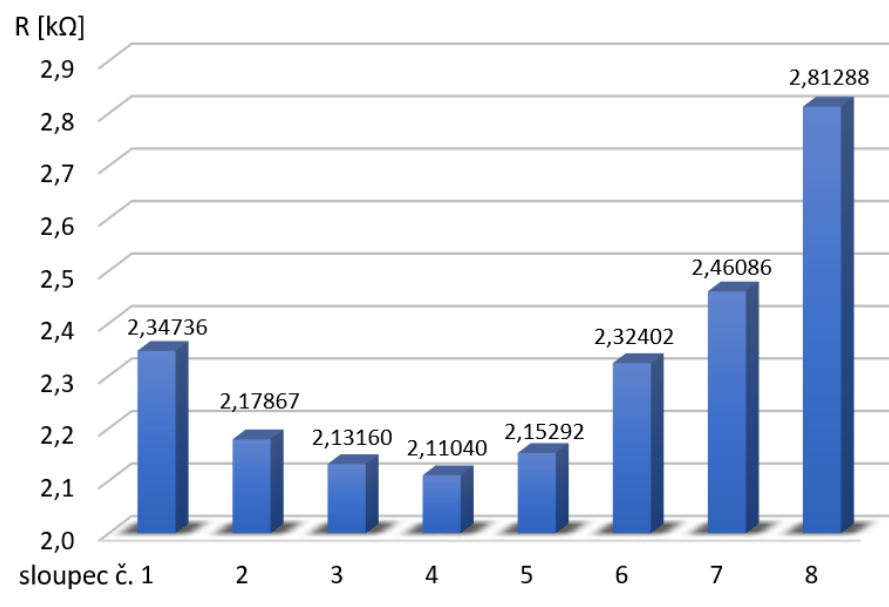


Obr. 4.4: Vypálený rezistor po tisku druhé vrstvy odporové pasty

Vzhledem k tomu, že bylo cílem natisknout rezistory na hodnotu 2,4 k $\Omega$ , aby bylo možné tyto rezistory dostavovat na nominální hodnotu 3 k $\Omega$ , byla natisknuta na již vypálené vrstvy další vrstva odporové pasty. Dle teoretických předpokladů by se měl odpor rezistorů zmenšit na hodnotu, jako by byly paralelně zapojeny dva právě tyto rezistory. Po natisknutí a výpalu druhé odporové vrstvy viz Obr. 4.4, pravděpodobně

nastavením jiných parametrů síťotisku, byl výsledný odpor rezistorů na nejlépe vytvořeném substrátu v rozmezí 1,79153 - 2,97944 k $\Omega$ . Toto odporové pole vytvořené na substrátu již bylo vhodné pro dostavování odporu rezistorů.

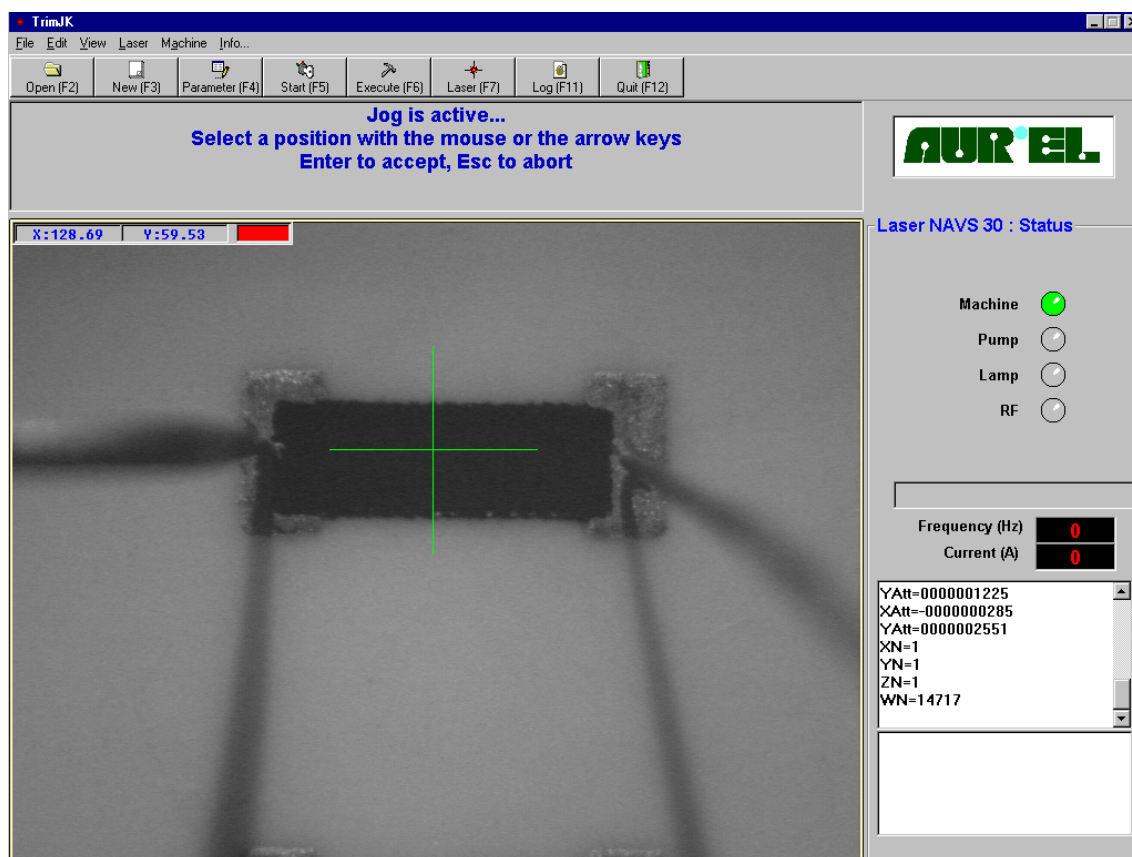
Z hodnot odporů rezistorů v jednotlivých sloupcích byla vypočítána průměrná hodnota odporu sloupce. Z těchto hodnot byla sestrojena sloupcová grafická závislost viz Obr. 4.5. Z tohoto grafu plyne, že rezistory s nejnižší průměrnou hodnotou byly vytvořeny uprostřed, zatímco rezistory s nejvyšší průměrnou hodnotou byly vytvořeny v krajních částech substrátu. To mohlo být způsobeno právě opotřebením (špatným napnutím) síťoviny nebo špatně nastavenými parametry tisku.



Obr. 4.5: Sloupcový graf průměrných hodnot odporu rezistoru v sloupci

## 5 DOSTAVOVÁNÍ LASEREM AUREL ALS300

Pro vytváření řezů do rezistorů vytvořených na testovacím substrátu bylo použito zařízení AUREL ALS300, které využívá výkonný YAG:Nd laser. K řízení laseru a jednotlivých řezů byl použit program PROTOMAT viz Obr. 5.1, který využívá právě zařízení AUREL ALS300 pro dostavování odporů rezistorů.



Obr. 5.1: Program PROTOMAT využívající zařízení AUREL ALS300

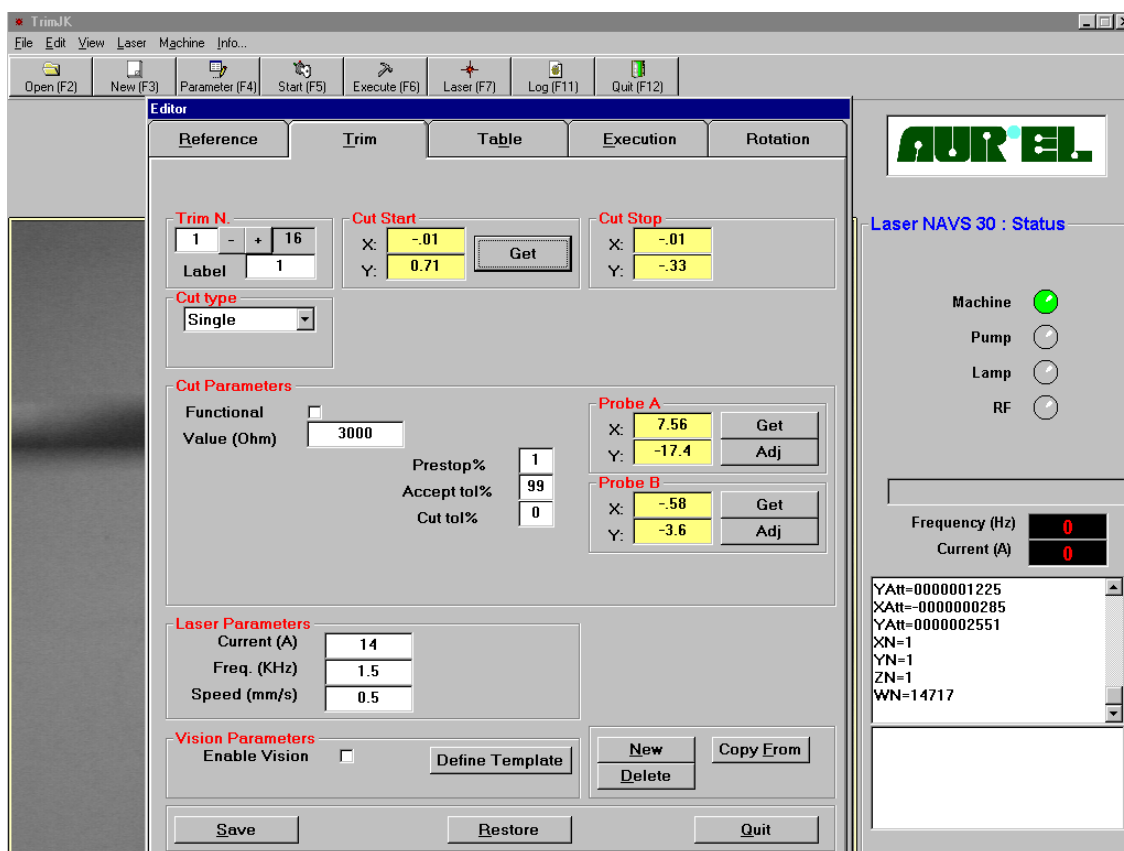
### 5.1 Postup při dostavování

V programu PROTOMAT byl pro bakalářskou práci vytvořen nový soubor s názvem TrimJK. V tomto souboru byly nastavovány všechny typy dostavovacích řezů. Nejprve musel být manuálně zaostřen testovací substrát s rezistory integrovanou CCD kamerou v zařízení AUREL. CCD kamerou byla zvolena oblast pomocí kurzoru v souřadnicovém systému xy, která byla zobrazena na monitoru během působení paprsku laseru. Tedy byla vybrána oblast, kde byl prováděn řez rezistorem. Zobrazení aktuální oblasti činného paprsku laseru umožňovalo kdykoliv laser zastavit



klávesnicí Esc. Po vybrání oblasti byly umístěny měřící sondy na vodivé plošky TLV rezistoru. Těmito sondami byl měřen elektrický odpor dostavovaného rezistoru zařízením KEITHLEY Model 2700 během působení laseru, kdy bylo působení laseru automaticky přerušeno, jakmile bylo dosaženo hodnoty blízké nominální hodnotě odporu rezistoru. Poté už byly nastavovány parametry řezu a laseru viz Obr. 5.2.

Jako první byl vždy nastaven typ řezu (Cut type) z výchozích řezů v programu PROTOMAT např. Single, Double, L-cut. Výběrem byl zvolen typ řezu a poté mohl být zvolen pomocí kurzoru v souřadnicovém systému xy začátek (Cut Start) a konec (Cut Stop) řezu. Následně byla napsána do políčka Value nominální hodnota odporu rezistoru. U typu řezu Single bylo možné nastavit přerušení řezu (Prestop), přijatelnou dostavenou hodnotu odporu rezistoru (Accept to) a přesnost dostavení odporu rezistoru (Cut to). U typu řezu L-cut a Double musel být navíc nastaven tzv. otočný bod (Turn point), který určoval do kolika procent dotavované hodnoty odporu rezistoru bude proveden první řez a následně na něj navázán další. Na závěr byly nastaveny parametry laseru: proud (Current), frekvence (Freq.) a rychlost paprsku (Speed). Po nastavení všech těchto parametrů byl Editor uložen a kliknutím na ikonu Execute byl proveden nastavený řez.



Obr. 5.2: Editor pro nastavení parametrů řezu a laseru

## 5.2 Nastavení parametrů laseru

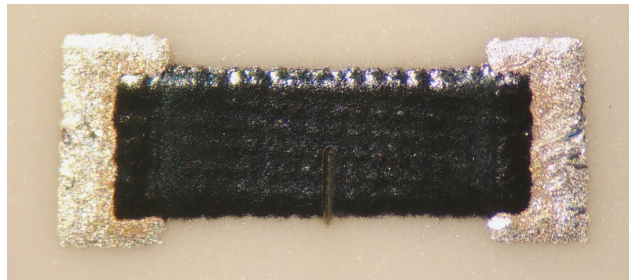
Laser zařízení AUREL ALS300 byl nastavován třemi základními parametry: proudem, rychlostí a frekvencí laseru viz Obr. 5.2. Jak již bylo zmíněno v kapitole Návrh struktury testovacího substrátu, na substrát byly vytvořeny dva sloupce rezistorů navíc pro nastavení právě těchto parametrů laseru. Postupným měněním těchto tří hodnot bylo pomocí mikroskopu vyhodnocováno, zda dochází k vypařování odporového materiálu v celé tloušťce vrstvy a zároveň nedochází k poškození substrátu. Jemnost řezu byla určena početně ze vzorců 2.4 a 2.5. Aby bylo možné tyto vzorce použít, byl mikroskopem změřen průměr stopy paprsku, který byl naměřen  $50 \mu\text{m}$ . Pro dostavování všech odporů na testovacím substrátu byly zvoleny parametry laseru: proud 14 A, frekvence 1,5 kHz a rychlost laseru  $0,03 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Při zvolení těchto parametrů laseru bylo překrytí jednotlivých stop paprsku laseru 60 % viz výpočet podle vzorce 5.2 níže:

$$l_{\text{stopy}} = \frac{v_{\text{dostav}}}{f} = \frac{0,03}{1,5 \cdot 10^3} = 20 \mu\text{m} \quad (5.1)$$

$$p = \frac{d_{\text{stopy}} - l_{\text{stopy}}}{d_{\text{stopy}}} \cdot 100 = \frac{50 \cdot 10^{-6} - 20 \cdot 10^{-6}}{50 \cdot 10^{-6}} \cdot 100 = 60 \% \quad (5.2)$$

## 5.3 Vytváření řezů

I-řez byl vytvářen zvolením typu řezu Single v Editoru programu PROTOMAT. Poté byli zadány parametry řezu: nominální hodnota  $3000 \Omega$ , přerušení řezu v 0 % (nedojde k přerušení), přijatelná dostavená hodnota odporu rezistoru od 99 % a přesnost dostavení odporu rezistoru 1 %. Po nastavení těchto parametrů byl zadán pomocí kurzoru v souřadnicovém systému xy začátek řezu, který byl umístěn do středu délky těla rezistoru, těsně před odporovou vrstvou. Konec řezu byl umístěn se stejnou souřadnicí v ose x jako začátek řezu, ale na druhou stranu těla rezistoru viz Obr. 5.3.



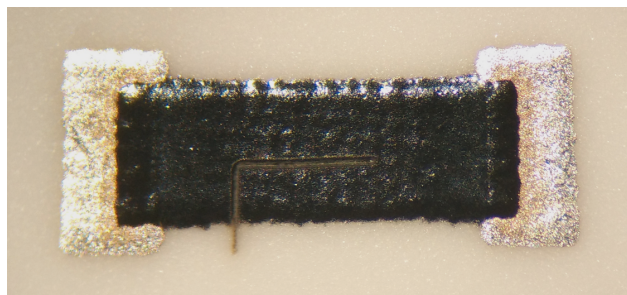
Obr. 5.3: I-řez vytvořený zařízením AUREL ALS300

Tímto způsobem byly provedeny I-řezy do celého sloupce rezistorů, tedy do jedenácti rezistorů. Jelikož počáteční hodnoty nedostavovaných rezistorů byly odlišné, byl každý s rezistorů dostaven s jinou přesností od nominální hodnoty odporu rezistoru. Minimální přesnost 2,28 % dostavení odporu rezistoru na nominální hodnotu při vytváření I-řezu zařízením AUREL byla dosažena při dostavování odporu rezistoru s počáteční hodnotou 2,28744 k $\Omega$ . Naopak největší dostavovací přesnost 0,92 % byla docílena při dostavování odporu rezistoru s počáteční hodnotou 2,58541 k $\Omega$ . Tím bylo zjištěno, že při vytváření I-řezu platí, čím delší řez, tím menší dostavovací přesnost odporu rezistoru. Dále byl proveden aritmetický průměr odchylek všech dostavených rezistorů s I-řezem z čehož vyplynulo, že zařízením AUREL ALS300 bylo dosaženo přesnosti při dostavení I-řezem v průměru 1,46 %.

Tab. 5.1: Hodnoty při dostavování odporu rezistoru I-řezem

Rezistor č.	$R_{poč}$ [k $\Omega$ ]	$R_{dostav}$ [k $\Omega$ ]	odchylka [%]
1	2,52576	3,03036	1,00
2	2,58541	3,02795	0,92
3	2,42173	3,03602	1,19
4	2,37259	3,04608	1,51
5	2,18146	3,04838	1,59
6	2,24937	3,06630	2,16
7	2,20868	3,04514	1,48
8	2,03724	3,03805	1,25
9	2,26553	3,04178	1,37
10	2,28744	3,06986	2,28
11	2,68571	3,04043	1,33

Při dostavování odporu rezistoru L-řezem byl vybrán v Editoru programu PRO-TOMAT typ řezu L-cut. Do programu byly zadány tyto parametry řezu: nominální hodnota 3000  $\Omega$ , otočný bod v 30 % dostavované hodnoty odporu rezistoru, přerušení řezu v 0 %, přijatelná dostavená hodnota odporu rezistoru od 99 % a přesnost dostavení odporu rezistoru 1 %. Nastavením otočného bodu nebylo zapotřebí zadávat délku první části řezu, jelikož touto procentuální hodnotou bylo zádáno, že při dostavení odporu rezistoru na danou hodnotu bude automaticky vedena druhá část řezu, která bude navazovat na konci první části řezu kolmo k tomuto řezu. Následně byl zadán začátek L-řezu, který byl umístěn 500  $\mu\text{m}$  od levé vodivé plošky a konec řezu, který byl umístěn do rohu rezistoru po směru druhé části řezu, jelikož jakmile byl rezistor dostaven na nominální hodnotu, byl řez přerušen viz Obr. 5.4.



Obr. 5.4: L-řez vytvořený zařízením AUREL ALS300

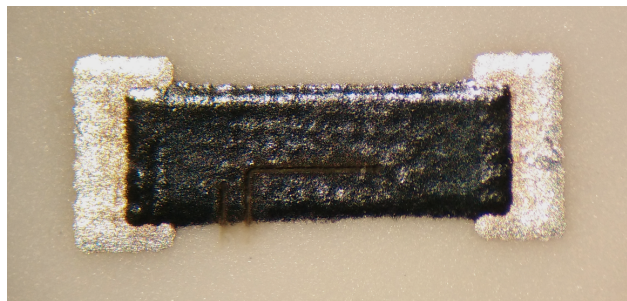
Naměřené hodnoty odporů rezistorů při dostavování pomocí L-řezu byly zapsány do Tab. 5.2. Z těchto hodnot byly dopočítány odchylky, s jakou přesností byly dostaveny odpory rezistorů. Zprůměrováním všech těchto hodnot bylo zjištěno, že pomocí L-řezu byly dostavovány odpory rezistoru s průměrnou přesností 0,55 %.

Tab. 5.2: Hodnoty při dostavování odporu rezistoru L-řezem

Rezistor č.	$R_{poč}$ [k $\Omega$ ]	$R_{dostav}$ [k $\Omega$ ]	odchylka [%]
1	2,44201	3,02022	0,67
2	2,40736	3,01408	0,47
3	2,29573	3,01509	0,50
4	2,18306	3,01687	0,56
5	2,09065	3,01826	0,61
6	2,01887	3,01352	0,45
7	1,98890	3,01628	0,54
8	1,97119	3,01920	0,64
9	2,00357	3,01524	0,51
10	2,09645	3,01284	0,43
11	2,46754	3,02072	0,69

U dostavování odporu rezistoru L-řezem s dostavovacím řezem bylo zapotřebí použít dva typy výchozích řezů v programu PROTOMAT. První byl vytvářen L - řez, kdy byl nastaven typ řezu L-cut s parametry řezu: nominální hodnota 3000  $\Omega$ , otočný bod v 30 % dostavované hodnoty odporu rezistoru, přerušení řezu v 0 %, přijatelná dostavená hodnota odporu rezistoru od 99 % a přesnost dostavení odporu rezistoru 1 %. Následně byl zadán začátek řezu, který byl umístěn 600  $\mu\text{m}$  od levé vodivé plošky a konec řezu, který byl umístě do rohu rezistoru po směru druhé části řezu. Tímto řezem byly odpory rezistorů dostaveny na hodnotu okolo 2990  $\Omega$ . Po vytvoření L-řezu byl nastaven typ řezu Single. Parametry tohoto řezu byly nastaveny:

nominální hodnota  $3000\ \Omega$ , přerušení řezu v 0 %, přijatelná dostavená hodnota odporu rezistoru od 99 % a přesnost dostavení odporu rezistoru 1 %. Tento řez byl umístěn  $200\ \mu\text{m}$  před L-řez viz Obr. 5.5.



Obr. 5.5: L-řez s dostavovacím řezem vytvořený zařízením AUREL ALS300

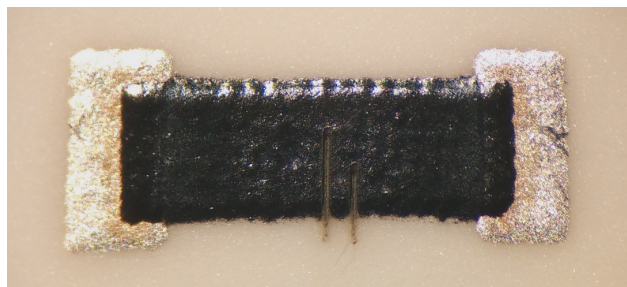
Z naměřených hodnot odporů dostavených rezistorů viz Tab. 5.3, byla zřejmá hlavní výhoda L-řezu s dostavovacím řezem oproti L-řezu a to přesnost dostavení odporu rezistoru na nominální hodnotu. Průměrná hodnota přesnosti dostavení odporu rezistoru na nominální hodnotu L-řezem s dostavovacím řezem byla zařízením AUREL ALS300 0,20 %.

Tab. 5.3: Hodnoty při dostavování odporu rezistoru L-řezem s dostavovacím řezem

Rezistor č.	$R_{poč}$ [k $\Omega$ ]	$R_{dostav}$ [k $\Omega$ ]	odchylka [%]
1	2,52349	3,00860	0,29
2	2,09151	3,00640	0,21
3	2,13862	3,00690	0,23
4	2,08581	3,00459	0,15
5	2,08620	3,00727	0,24
6	2,03631	3,00542	0,18
7	2,07153	3,00511	0,17
8	1,90274	3,00525	0,17
9	1,96543	3,00511	0,17
10	2,07487	3,00501	0,17
11	2,47108	3,00757	0,25

Při dostavování odporu rezistoru D-řezem byl použit typ řezu Double v Editoru programu PROTOMAT. Do parametrů řezu byly zadány následující hodnoty: nominální hodnota  $3000\ \Omega$ , otočný bod v 91 % dostavované hodnoty odporu rezistoru, přerušení řezu v 0 %, přijatelná dostavená hodnota odporu rezistoru od 99 % a přesnost dostavení odporu rezistoru 1 %. Otočným bodem zde bylo nastaveno, že první

delší řez byl veden tak dlouho, dokud nebyl odpor rezistor dostaven na 91 % dostavované hodnoty odporu rezistoru. Poté byl automaticky proveden druhý kratší řez, kterým byl odpor rezistoru dostaven na nominální hodnotu. Začátek řezu byl umístěn do poloviny délky těla rezistoru a konec řezu byl umístěn na opačnou stranu než začátek řezu, 200  $\mu\text{m}$  v ose x za začátek řezu viz Obr. 5.6.



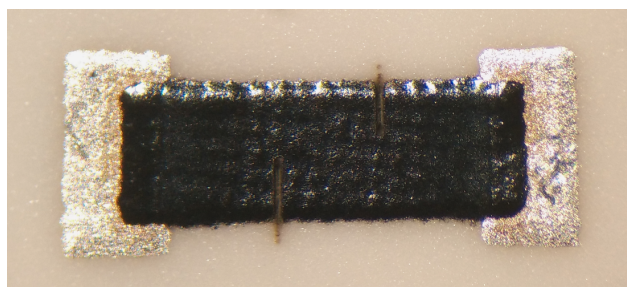
Obr. 5.6: D-řez vytvořený zařízením AUREL ALS300

Z naměřených hodnot dostavených odporů rezistorů D-řezem byla vytvořena tabulka viz Tab. 5.4, kde byly dopočítány odchylky dostavení odporu rezistorů od nominální hodnoty. Z těchto hodnot byla vypočtená průměrná odchylka dostavování odporu rezistoru D-řezem 0,61 %. Tedy pomocí D-řezu bylo docíleno větší přesnosti dostavení než u I-řezu, ale menší přesnosti dostavení než u L-řezu a L-řezu s dostavovacím řezem.

Tab. 5.4: Hodnoty při dostavování odporu rezistoru D-řezem

Rezistor č.	$R_{poč}$ [k $\Omega$ ]	$R_{dostav}$ [k $\Omega$ ]	odchylka [%]
1	2,54690	3,01855	0,61
2	2,21518	3,02633	0,87
3	2,18914	3,01306	0,43
4	2,01769	3,02642	0,87
5	2,03030	3,01414	0,47
6	1,97734	3,01785	0,59
7	1,90578	3,01822	0,60
8	1,95975	3,01845	0,61
9	1,95895	3,01298	0,43
10	2,02738	3,01868	0,62
11	2,38594	3,01647	0,55

Dvojitý obrácený řez byl vytvářeny pomocí dvou řezů typu Single, kdy cílem bylo prvním řezem dostavit 50 % dostavované hodnoty odporu rezistoru. Proto u každého rezistoru byla dopočítána hodnota pro dostavení odporu rezistoru na 50 % dostavované hodnoty. Např. byl dostavován rezistor s počáteční hodnotou odporu nejbližší 2,4 k $\Omega$ , tedy rezistor na testovacím substrátu s hodnotou 2,409 k $\Omega$ . Pro tento rezistor byly nastaveny parametry prvního řezu: nominální hodnota 2705  $\Omega$  (50 % dostavované hodnoty odporu rezistoru), přerušení řezu v 0 %, přijatelná dostavená hodnota odporu rezistoru od 99 % a přesnost dostavení odporu rezistoru 1 %. Poté byl zvolen začátek řezu, který byl umístěn 800  $\mu\text{m}$  od levé vodivé plošky těsně před odporovou vrstvou a konec řezu, který byl umístěn se stejnou souřadnicí v ose x jako začátek řezu, ale na druhou stranu těla rezistoru. Po vytvoření prvního řezu byl opět řezem tupu Single dostaven rezistor již na nominální hodnotu. Nastaveny byly parametry řezu: nominální hodnota 3000  $\Omega$ , přerušení řezu v 0 %, přijatelná dostavená hodnota odporu rezistoru od 99 % a přesnost dostavení odporu rezistoru 1 %. Začátek druhého řezu byl umístěn z druhé strany těla rezistoru než začátek prvního řezu 800  $\mu\text{m}$  od pravé vodivé plošky. Konec řezu byl umístěn obdobně jako při předchozím řezu se stejnou souřadnicí v ose x jako začátek druhého řezu na opačnou stranu těla rezistoru. Vzdálenost mezi oběma řezy tak byla 800  $\mu\text{m}$  viz Obr. 5.7.



Obr. 5.7: Dvojitý obrácený řez vytvořený zařízením AUREL ALS300

I když tento řez bývá spíše používán pro dostavování rezistorů s velkým rozdílem počáteční hodnoty odporu oproti nominální hodnotě, bylo při dostavování dvojitým obráceným řezem zařízením AUREL ALS300 dosaženo větší přesnosti dostavení odporu rezistoru viz Tab. 5.5 než I-řezem viz Tab. 5.1. To bylo pravděpodobně způsobeno tím, že při dvojitém obráceném řezu nebylo zapotřebí provádět tak dlouhé řezy. Rezistory byly dostavovány dvojitým obráceným řezem s průměrnou přesností 0,82 %.

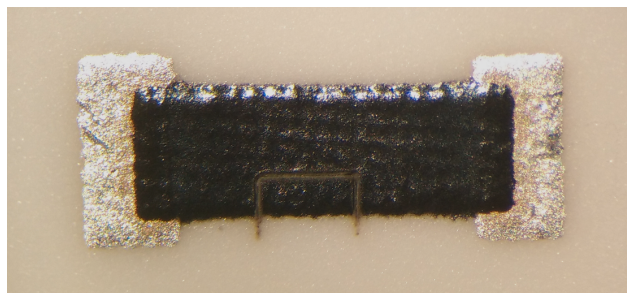


Tab. 5.5: Hodnoty při dostavování odporu rezistoru dvojitým obráceným řezem

Rezistor č.	$R_{poč}$ [k $\Omega$ ]	$R_{dostav}$ [k $\Omega$ ]	odchylka [%]
1	2,64856	3,02182	0,72
2	2,40934	3,02531	0,84
3	2,32469	3,02482	0,82
4	2,19565	3,03845	1,27
5	2,22150	3,02201	0,73
6	2,16190	3,02005	0,66
7	2,22339	3,02108	0,70
8	2,16943	3,03090	1,02
9	2,16193	3,01859	0,62
10	2,38590	3,02779	0,92
11	2,66194	3,02185	0,72

Stejně jako tomu bylo u L-řezu s dostavovacím řezem, při vytváření U-řezu bylo zapotřebí použít dva typy výchozích řezů L-cut a Single v programu PROTOMAT. První byl proveden L-řez, kdy byl nastaven typ řezu L-cut s parametry řezu: nominální hodnota 2985  $\Omega$ , otočný bod v 30 % dostavované hodnoty odporu rezistoru, přerušení řezu v 0 %, přijatelná dostavená hodnota odporu rezistoru od 99 % a přesnost dostavení odporu rezistoru 1 %. Následně byl zadán začátek řezu, který byl umístěn 700  $\mu\text{m}$  od levé vodivé plošky a konec řezu, který byl umístěn do rohu rezistoru po směru druhé části řezu. Tímto řezem byly rezistory dostaveny na hodnotu okolo 2995  $\Omega$ . Pro uzavření L-řezu a tím vytvoření U-řezu byl nastaven typ řezu Single. Nastavené parametry tohoto řezu byly: nominální hodnota 3100  $\Omega$ , přerušení řezu v 0 %, přijatelná dostavená hodnota odporu rezistoru od 99 % a přesnost dostavení odporu rezistoru 1 %. Nominální hodnota byla zvolena větší, jelikož bylo zapotřebí uzavřít L-řez a nebylo schopné předpovídat, k jak velké změně odporu dojde s poslední částí U-řezu. Začátek tohoto řezu byl umístěn blízko od odporové vrstvy ve vzdálenosti od pravé vodivé plošky stejně jako konec L-řezu. Konec řezu Single byl umístěn do konce L-řezu, aby nedošlo k vytváření řezu dále za L-řez viz Obr. 5.8.





Obr. 5.8: U-řez vytvořený zařízením AUREL ALS300

Z Naměřených hodnot dostavených odporů rezistorů byla vytvořena tabulka viz Tab. 5.6. Z vypočtených odchylek dostavených odporů rezistorů byla vypočtena průměrná hodnota přesnosti dostavení odporu rezistoru při dostavování U-řezem 0,32 %. Tedy tímto řezem byly přesněji dostavovány rezistory než L-řezem nebo D-řezem, ale jelikož poslední částí řezu nebylo možné kontrolovat odpor rezistoru, tento řez se nehodí pro dostavování s větší přesností.

Tab. 5.6: Hodnoty při dostavování odporu rezistoru U-řezem

Rezistor č.	$R_{poč}$ [k $\Omega$ ]	$R_{dostav}$ [k $\Omega$ ]	odchylka [%]
1	2,65467	3,01228	0,41
2	2,56017	3,01163	0,39
3	2,42919	3,00568	0,19
4	2,42405	3,00956	0,32
5	2,27383	3,01067	0,35
6	2,33085	3,02019	0,67
7	2,37973	3,01101	0,37
8	2,37931	3,00622	0,21
9	2,39958	3,00780	0,26
10	2,47309	3,00498	0,17
11	2,76501	3,00507	0,17

## 5.4 Chyba multimetru KEITHLEY

Jelikož byli dostavené rezistory měřeny před dostavením i po dostavení multimetrem KEITHLEY model 2700, je zapotřebí předpokládat i chybu tohoto měřícího zařízení. Z výrobního listu toho multimetru bylo zjištěno, že při měření elektrického odporu v měřícím rozsahu  $10,00000\text{ k}\Omega$  bude chyba měřícího přístroje  $\delta_m = 0,0100\%$  a chyba z rozsahu  $\delta_r = 0,0006\%$  [24]. Pro příklad absolutní chyba multimetru KEITHLEY při měření dostaveného odporu rezistoru s L-řezem  $R = 3,01408\text{ k}\Omega$  bude:

$$\Delta_R = \pm \frac{\delta_m \cdot R + \delta_r \cdot R_{\text{rozsah}}}{100} = \frac{0,01 \cdot 3,01408 + 0,0006 \cdot 10}{100} = \pm 0,00036\text{ k}\Omega \quad (5.3)$$

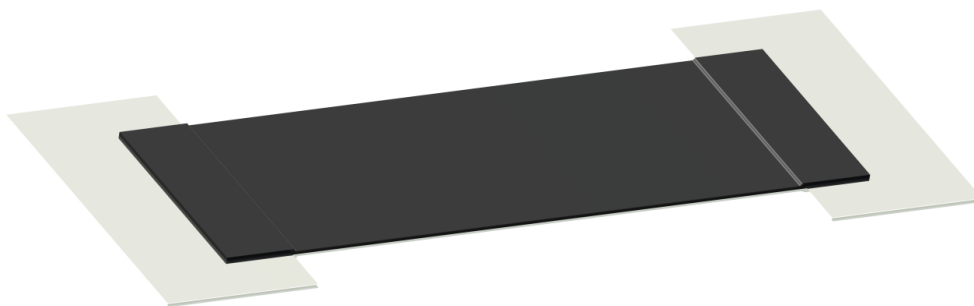
Pak relativní chyba tohoto dostaveného rezistoru s L-řezem bude:

$$\delta_R = \pm \frac{\Delta_m}{R} \cdot 100 = \frac{0,00036}{3,01408} \cdot 100 = \pm 0,01\% \quad (5.4)$$

Pokud by byla uvažována chyba měřícího zařízení KEITHLEY model 2700, musel by být tento výpočet proveden u všech dostavených rezistorů. Vzhledem k časové náročnosti byla chyba měřícího přístroje v práci zanedbána.

## 6 SIMULACE V ANSYS WORKBENCH

Pro simulaci byl vytvořen v programu Autodesk Inventor Professional 2017 3D model navrhnutého rezistoru na substrátu viz Obr. 6.1. Tento model byl simulován s jednotlivými řezy v simulačním programu ANSYS Workbench 17.0 pomocí elektrické systémové analýzy. Řezy byly vytvářeny podle parametrů YAG:Nd laseru zařízení AUREL ALS300, tedy průměr stopy paprsku byl  $50\text{ }\mu\text{m}$ . Dále bylo předpokládáno překrytí stop paprsků 60 % (minimální rozlišení  $20\text{ }\mu\text{m}$ ). Jelikož začátek řezu byl volen pomocí programu PROTOMAT, který měl v souřadnicovém systému xy nejmenší rozlišení  $10\text{ }\mu\text{m}$ , bylo předpokládáno nejmenší rozlišení umístění začátku řezu  $10\text{ }\mu\text{m}$ .



Obr. 6.1: 3D model navrhovaného rezistoru

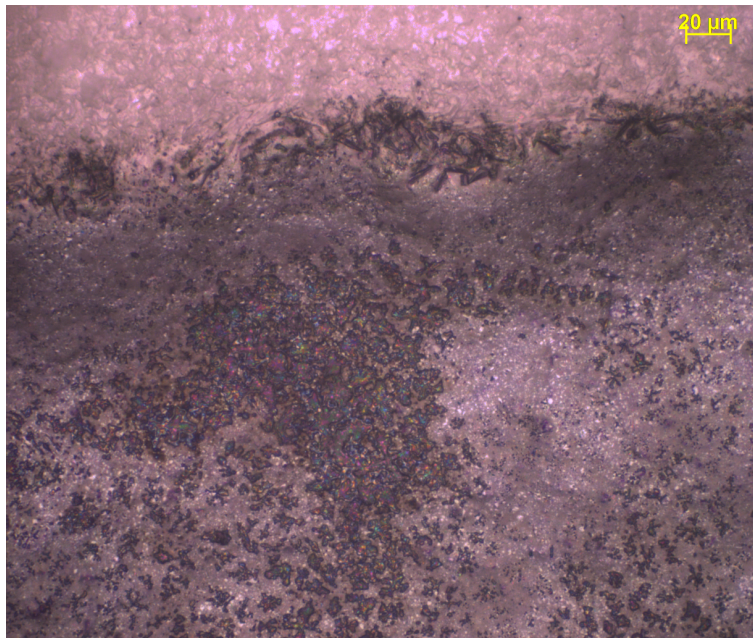
### 6.1 Data pro simulaci

Pro simulaci v elektrické systémové analýze programu ANSYS Workbench 17.0, bylo zapotřebí zadat do tohoto programu rezistivitu jednotlivých materiálů. Z tohoto důvodu byl proveden přepočítání odporu vodivých plošek a těla vytvořených rezistorů na rezistivitu. Ze vzorce 2.1 byla vyjádřena rezistivita:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} = \rho \cdot \frac{l}{w \cdot t} \Rightarrow \rho = R \cdot \frac{w \cdot t}{l} \quad (6.1)$$

Pro co nejpřesnější výpočet rezistivity byla změřena tloušťka vodivé a odporové vrstvy vytvořeného rezistoru na testovacím substrátu. Tloušťka vodivé vrstvy byla naměřena pomocí mikroskopu JENAVERT  $9\text{ }\mu\text{m}$ . Jelikož pro tuto práci byla směrodatnější tloušťka odporové vrstvy, byla tato vrstva měřena pomocí přesnějšího mikroskopu ZEISS, kdy nejprve byl manuálně zaostřen povrch odporové vrstvy a poté již automaticky zaostřen povrch substrátu viz Obr. 6.2 (spodní (tmavější) část - povrch odporové vrstvy, horní (světlejší) část - povrch substrátu). Mikroskop podle

různých hloubek ostrosti vyhodnotil vzdálenost povrchu odporové vrstvy od povrchu substrátu. Tímto způsobem byli provedeny dvě měření s naměřenými tloušťkami odporové vrstvy  $19,6 \mu\text{m}$  a  $17,2 \mu\text{m}$ . Pro výpočet rezistivity odporového materiálu byl tedy uvažován průměr těchto dvou hodnot  $t_{OP} = 18,4 \mu\text{m}$ .



Obr. 6.2: Detail odporové vrstvy a substrátu zobrazen mikroskopem ZEISS

Podle vzorce 6.1 byla vypočítána rezistivita odporové vrstvy jednotlivých rezistorů vytvořených na testovacím substrátu bez vytvořených řezů, které se nejvíce blížili hodnotě  $2,4 \text{ k}\Omega$ . Rezistivita odporové vrstvy rezistoru, na které byl vytvořen I-řez při počáteční hodnotě odporu  $R_I = 2,421 \text{ k}\Omega$ :

$$\rho_I = R_I \cdot \frac{w \cdot t_{OP}}{l} = 2,421 \cdot 10^3 \cdot \frac{1 \cdot 10^{-3} \cdot 18,4 \cdot 10^{-6}}{2,4 \cdot 10^{-3}} = 1,8561 \cdot 10^{-2} \Omega \cdot m \quad (6.2)$$

Rezistivita odporové vrstvy rezistoru, na které byl vytvořen L-řez při počáteční hodnotě odporu  $R_L = 2,407 \text{ k}\Omega$ :

$$\rho_L = R_L \cdot \frac{w \cdot t_{OP}}{l} = 2,407 \cdot 10^3 \cdot \frac{1 \cdot 10^{-3} \cdot 18,4 \cdot 10^{-6}}{2,4 \cdot 10^{-3}} = 1,8454 \cdot 10^{-2} \Omega \cdot m \quad (6.3)$$

Rezistivita odporové vrstvy rezistoru, na které byl vytvořen L-řez s nastavovacím řezem při počáteční hodnotě odporu  $R_{L-ds} = 2,471 \text{ k}\Omega$ :

$$\rho_{L-ds} = R_{L-ds} \cdot \frac{w \cdot t_{OP}}{l} = 2,471 \cdot 10^3 \cdot \frac{1 \cdot 10^{-3} \cdot 18,4 \cdot 10^{-6}}{2,4 \cdot 10^{-3}} = 1,8944 \cdot 10^{-2} \Omega \cdot m \quad (6.4)$$

Rezistivita odporové vrstvy rezistoru, na které byl vytvořen D-řez při počáteční hodnotě odporu  $R_D = 2,385 \text{ k}\Omega$ :

$$\rho_D = R_D \cdot \frac{w \cdot t_{OP}}{l} = 2,385 \cdot 10^3 \cdot \frac{1 \cdot 10^{-3} \cdot 18,4 \cdot 10^{-6}}{2,4 \cdot 10^{-3}} = 1,8285 \cdot 10^{-2} \Omega \cdot m \quad (6.5)$$

Rezistivita odporové vrstvy rezistoru, na které byl vytvořen dvojitý obrácený řez při počáteční hodnotě odporu  $R_{ob} = 2,409 \text{ k}\Omega$ :

$$\rho_{ob} = R_{ob} \cdot \frac{w \cdot t_{OP}}{l} = 2,409 \cdot 10^3 \cdot \frac{1 \cdot 10^{-3} \cdot 18,4 \cdot 10^{-6}}{2,4 \cdot 10^{-3}} = 1,8469 \cdot 10^{-2} \Omega \cdot m \quad (6.6)$$

Rezistivita odporové vrstvy rezistoru, na které byl vytvořen U-řez při počáteční hodnotě odporu  $R_U = 2,424 \text{ k}\Omega$ :

$$\rho_U = R_U \cdot \frac{w \cdot t_{OP}}{l} = 2,424 \cdot 10^3 \cdot \frac{1 \cdot 10^{-3} \cdot 18,4 \cdot 10^{-6}}{2,4 \cdot 10^{-3}} = 1,8584 \cdot 10^{-2} \Omega \cdot m \quad (6.7)$$

Přepočet odporu vodivých plošek na rezistivitu byl proveden taktéž pomocí vzorce 6.1 při změřené tloušťce vodivých plošek  $t_{VP} = 9 \text{ }\mu\text{m}$ . Rezistivita vodivých plošek při uvažování mezní hodnoty odporu na čtverec  $R_{VP} = 3 \text{ m}\Omega/\square$  vodivé pasty ESL-9912A [25], kterou udává výrobce bude:

$$\rho_{VP} = R_{VP} \cdot \frac{w \cdot t_{VP}}{l} = 3 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 9 \cdot 10^{-6}}{0,7 \cdot 10^{-3}} = 2,7 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m \quad (6.8)$$

Jelikož bylo TLV odporové pole vytvořeno na substrátu z korundové keramiky s 96% obsahem  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , jehož rezistivita  $\rho > 1 \cdot 10^{12} \Omega \cdot \text{m}$  [6], byla pro simulaci zvolena právě mezní hodnota rezistivity substrátu  $\rho_{sub} = 1 \cdot 10^{12} \Omega \cdot \text{m}$ .

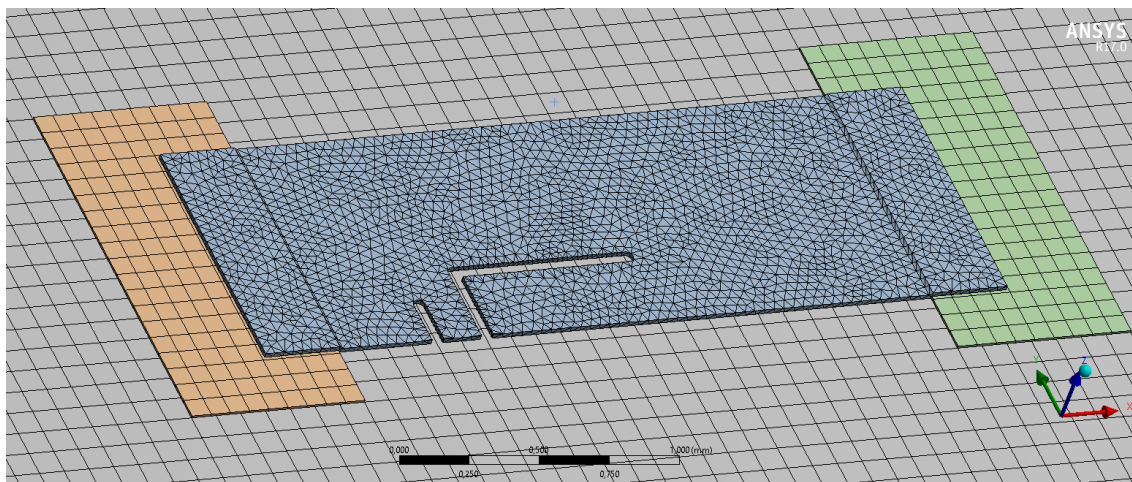
## 6.2 Nastavení simulace

Vždy před každou simulací byly do knihovny materiálů přidány rezistivity potřebných materiálů. Poté byl nahrán 3D model TLV rezistoru na substrátu vytvořený v programu Autodesk Inventor Professional 2017. Jednotlivým objektům tohoto modelu byli přiřazeny již dříve zadané rezistivity. Po tomto kroku byli nastaveny a definovány kontaktní plochy mezi jednotlivými objekty.

Důležitým krokem bylo nastavení tzv. zesíťování (mesh) modelu TLV rezistoru na substrátu viz Obr. 6.3. Jemnost zesíťování velmi ovlivňovala výpočetní výkon a čas simulace. Jelikož řezy byli prováděny do odporové vrstvy, byla tato vrstva zesíťována nejjemněji. U vodivých plošek a substrátu bylo zvoleno hrubší zesíťování především vzhledem k výpočetnímu výkonu simulace.

Po vygenerování zesíťování byli nastaveny počáteční podmínky simulace. U všech simulací bylo vždy na levou vodivou plošku přivedeno napětí 10 V a na pravou

vodivou plošku 0 V. Nastavením všech těchto parametrů mohlo být vybráno, jaké výpočetní řešení má být simulačním programem provedeno. Pro zjištění odporu rezistoru bylo použito výpočetní řešení Probe, kterým byl zjištěn proud rezistorem. Při známém nastaveném napětí na rezistoru byl pomocí Ohmova zákona dopočítán odpor rezistoru. Pro vyhodnocování jednotlivých řezů v TLV rezistorech z hlediska výkonového zatížení bylo použito výpočetní řešení Total Current Density, kterým byla zjištěna proudová hustota rezistorem.

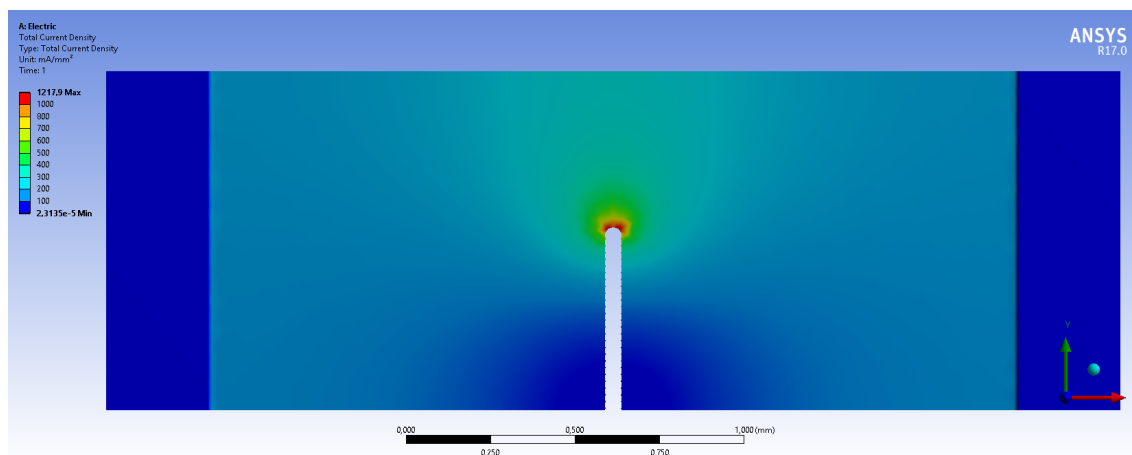


Obr. 6.3: Mesh modelu TLV rezistoru s L-řezem s dostavovacím řezem

## 6.3 Predikce řezů

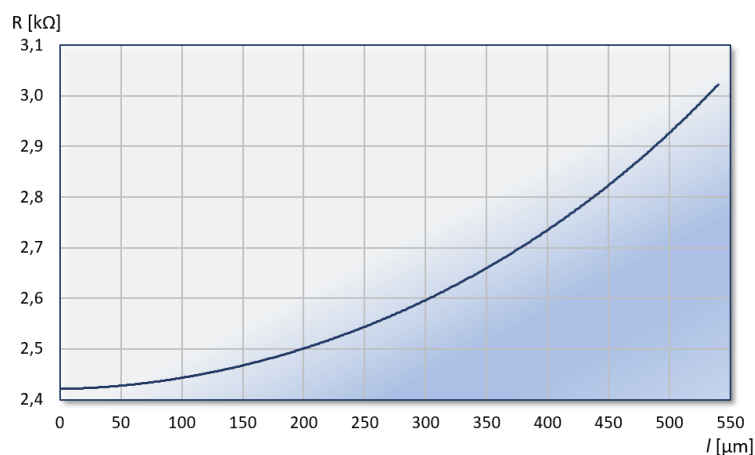
Nejprve byl predikován simulačním programem ANSYS Workbench 17.0 nejjednodušší I-řez. Řez byl umístěn přesně do poloviny délky rezistoru. Simulačním programem byly simulovány řezy o různé délce, dokud nedošlo k dostavení rezistoru na hodnotu nejbližší vyšší nominální hodnotě 3 k $\Omega$ . Z těchto simulací bylo zjištěno, že pro dostavení rezistoru bude zapotřebí řez dlouhý 540  $\mu\text{m}$ , kdy bude rezistor dostaven na hodnotu 3,02224 k $\Omega$ . Přesnost dostavení rezistoru tedy bude podle simulačního programu 0,74 %.

Pro vyhodnocení použití řezu z hlediska výkonového zatížení bylo použito výpočetní řešení Total Current Density, kterým byla zobrazena proudová hustota rezistorem viz Obr. 6.4. Z Obr. 6.4 si lze všimnout, že největší proudová hustota byla na konci řezu. Zde tedy bude nejcitlivější místo rezistoru, kde může dojít při větším výkonovém zatížení ke zničení rezistoru.



Obr. 6.4: Proudová hustota při I-řezu

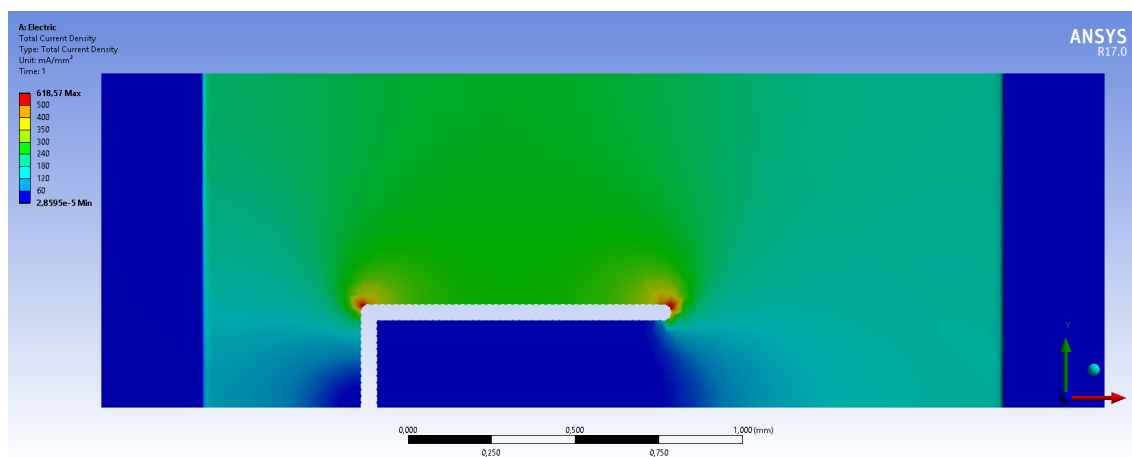
Z dat získaných simulací byla sestrojena grafická závislost odporu rezistoru na délce prováděného řezu viz Obr. 6.5. Grafická závislost má exponencionální průběh, čímž je zobrazena největší nevýhoda I-řezu a to exponencionální růst odporu rezistoru s délkou prováděného řezu. Čím delší řez bude, tím se dá předpokládat menší přesnost dostavení odporu rezistoru.



Obr. 6.5: Grafická závislost odporu rezistoru na délce provedeného I-řezu

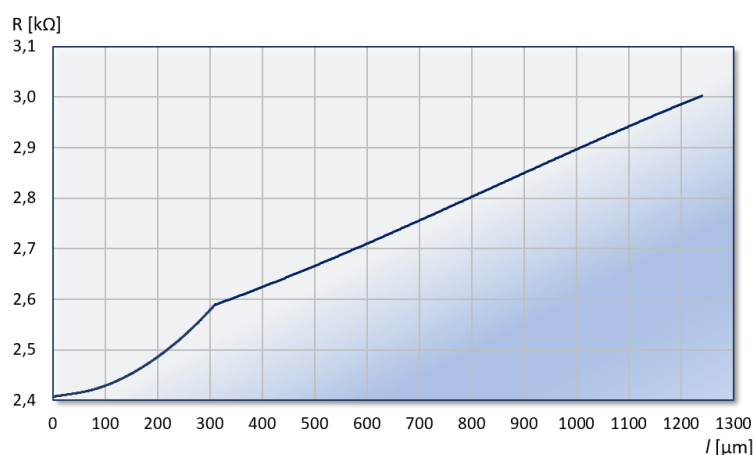
Dalším predikovaným dostavovacím řezem byl L-řez. První část L-řezu vedená kolmo k hustotě proudu byla umístěna 500  $\mu\text{m}$  od vodivé plošky. Jelikož v programu PROTOMAT, byl při vytváření L-řezu žádán tzv. otočný bod v procentech, bylo předpokládáno, že první částí řezu (I-řezem) bude dostaveno 30 % dostavované hodnoty odporu rezistoru. K dostavení rezistoru na tuto hodnotu bylo zapotřebí vést první část L-řezu dlouhou 310  $\mu\text{m}$ . Poté byla vedena druhá navazující část L-řezu

tak dlouho, dokud nebyla hodnota rezistoru nejbližší vyšší nominální hodnotě 3 k $\Omega$ . Podle simulačního programu musí být druhá část L-řezu dlouhá 930  $\mu\text{m}$  čímž bude rezistor dostaven na hodnotu 3,00372 k $\Omega$  s odchylkou od nominální hodnoty 0,12 %.



Obr. 6.6: Proudová hustota při L-řezu

Z proudové hustoty při provedeném L-řezu v odporové vrstvě rezistoru je patrné, že při L-řezu viz Obr. 6.6 bude dvakrát menší maximální proudová hustota v odporové vrstvě než při I-řezu viz Obr. 6.4. Z tohoto důvodu by mělo být možné použít L-řez při větším výkonovém zatížení než I-řez. Dále by bylo možné použít rezistor s tímto řezem jako topný rezistor. Jelikož nad L-řezem je oblast s větší proudovou hustotou, což znamená, že v této oblasti budou vznikat větší ztráty ve formě tepla.

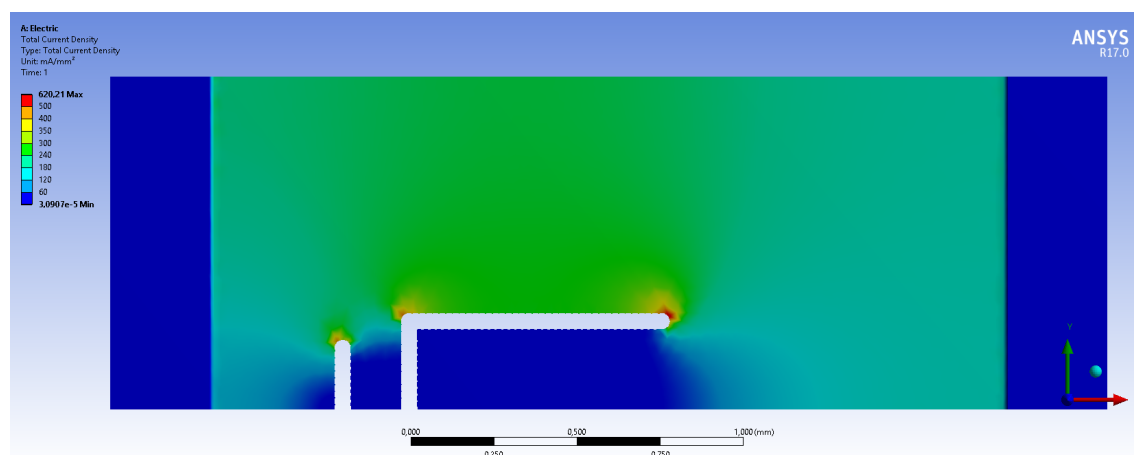


Obr. 6.7: Grafická závislost odporu rezistoru na délce provedeného L-řezu



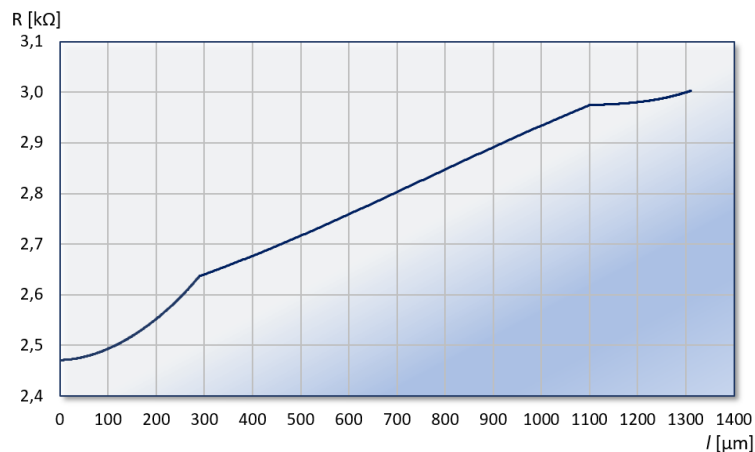
Na grafické závislosti viz Obr. 6.7 lze vidět hlavní přednost L-řezu oproti I-řezu a to zamezení exponenciálního růstu odporu rezistoru s délkou prováděného řezu. Vzhledem k tomu, že druhá část řezu byla vedena rovnoběžně s hustotou proudu, bude při vytváření druhé části řezu odpor rezistoru lineárně růst s délkou řezu.

Pro ještě přesnější dostavení rezistoru lze k L-řezu přidat tzv. nastavovací řez. Tento řez bývá umístěn před L-řez. Pro simulaci byl použit L-řez, jehož první část řezu byla umístěna 600  $\mu\text{m}$  od vodivé plošky a otočný bod byl zvolen 30 %. Pro dostavení rezistoru první části L-řezu na 30 % nastavované hodnoty byl zapotřebý řez dlouhý 290  $\mu\text{m}$ . Jelikož podle teoretických předpokladů bylo známo, že nastavovacím řezem lze dostavit 1 - 2 % od nominální hodnoty, byla zapotřebí druhá část L-řezu dlouhá 810  $\mu\text{m}$ , čímž byl rezistor dostaven na hodnotu 2,97460 k $\Omega$ . Nastavovací řez byl umístěn 200  $\mu\text{m}$  před L-řez, tedy 400  $\mu\text{m}$  od vodivé plošky. Pro dostavení rezistoru na hodnotu nejbližší vyšší nominální hodnotě 3 k $\Omega$  musí být délka nastavovacího řezu dlouhá 210  $\mu\text{m}$ , pak bude podle simulačního programu dostaven odpor rezistoru na hodnotu 3,00291 k $\Omega$ . Odchylka takto dostaveného rezistoru od nominální hodnoty bude 0,10 %.



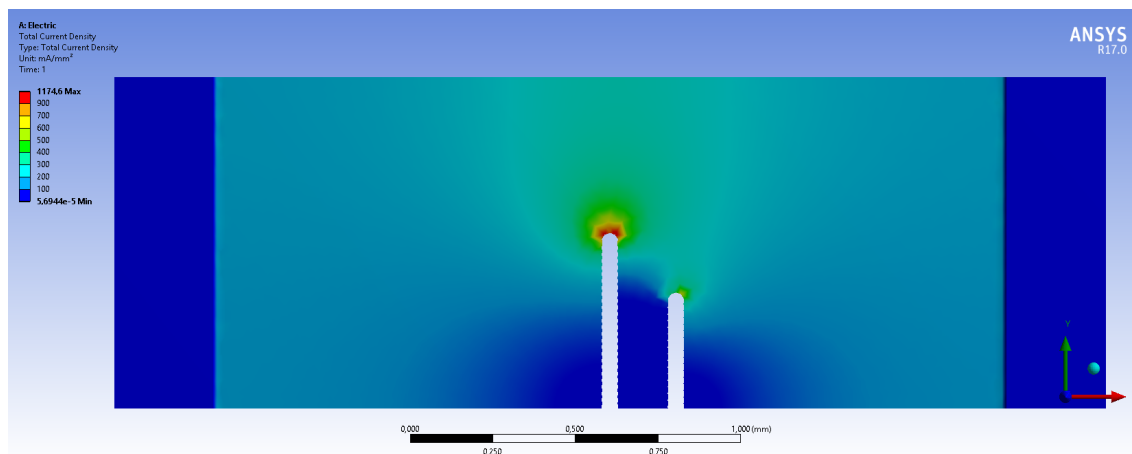
Obr. 6.8: Proudová hustota při L-řezu s nastavovacím řezem

Z hlediska proudové hustoty se L-řez s nastavovacím řezem viz Obr. 6.8 chová obdobně jako samotný L-řez viz Obr. 6.6. Použití tohoto typu řezu bude stejné jako u L-řezu. Využití ale především nalezne ve velmi přesných aplikacích. Na Obr. 6.9 je znázorněn průběh růstu odporu rezistoru s délkou prováděného L-řezu s nastavovacím řezem. Grafická závislost je obdobná jako u L-řezu, hlavní rozdíl zde je, že po L-řezu kdy byl proveden nastavovací řez, bylo docíleno velmi malé změny odporu s délkou tohoto řezu.



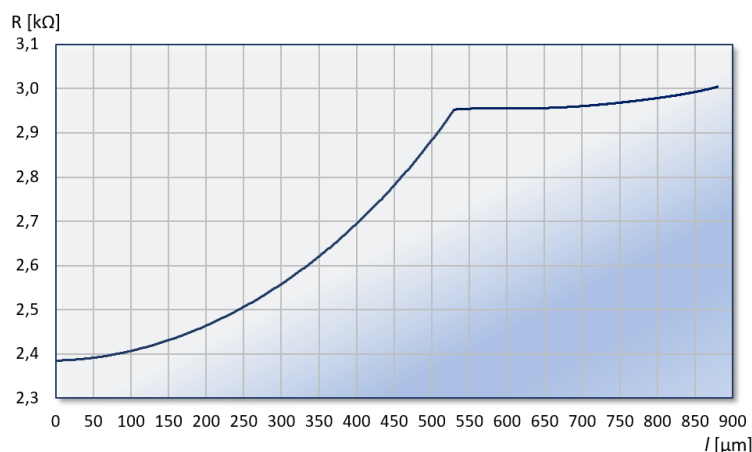
Obr. 6.9: Grafická závislost odporu rezistoru na délce L-řezu s nastavovacím řezem

Při predikci D-řezu, bylo opět předpokládáno použití zařízení AUREL ALS300 s programem PROTOMAT. Jelikož v programu PROTOMAT byl stejně jako při nastavování L-řezem zadáván tzv. otočný bod, pro predikci D-řezu simulačním programem ANSYS Workbench bylo předpokládáno, že delším řezem bude dostaveno 91 % nastavované hodnoty. Vzhledem k tomu byla provedená délka prvního řezu dlouhá  $530 \mu\text{m}$ , kdy byl podle simulačního programu odpor rezistoru dostaven na hodnotu  $2,95264 \text{ k}\Omega$ . Tento řez byl umístěn do středu těla rezistoru. Druhý kratší řez byl umístěn  $200 \mu\text{m}$  za první řez. Aby byl rezistor dotaven co nejbližší vyšší nominální hodnotu  $3 \text{ k}\Omega$ , druhý řez byl veden  $350 \mu\text{m}$ , čímž byl rezistor dostaven na hodnotu  $3,00427 \Omega$ . Přesnost takto dostaveného rezistoru dosahovala  $0,14 \%$ .



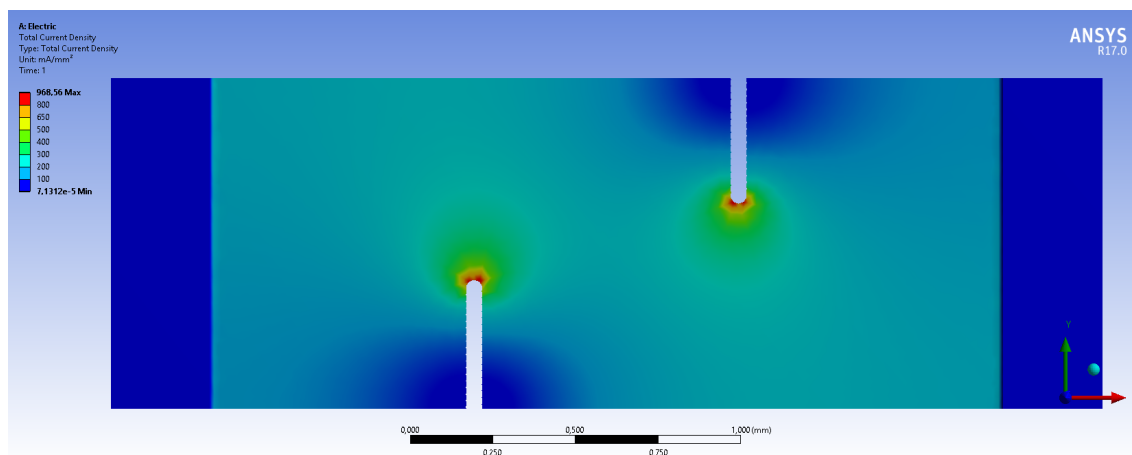
Obr. 6.10: Proudová hustota při D-řezu

Na Obr. 6.10 je zobrazena proudová hustota v odporové vrstvě, která byla získána výpočetním řešením Total Current Density v programu ANSYS Workbench. Z Obr. 6.10 je patrné, že D-řez bude použitelný pro podobné výkonové zatížení jako I-řez viz Obr. 6.4. Z grafické závislosti viz Obr. 6.11 setrojené z hodnot získaných simulačním programem ANSYS Workbench lze vyčíst, že D-řezem lze taktéž do jisté míry předcházet exponenciálnímu růstu odporu rezistoru s délkou prováděného řezu. Ovšem jakmile se druhý kratší řez bude blížit délce prvního řezu bude opět docházet k exponenciální změně odporu rezistoru s délkou řezu.



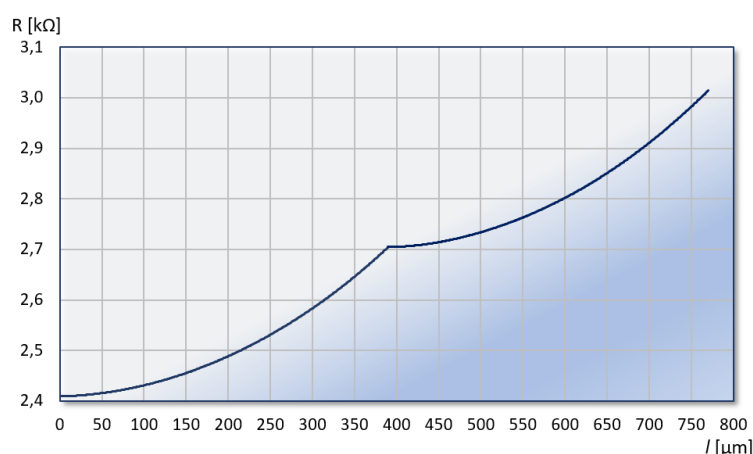
Obr. 6.11: Grafická závislost odporu rezistoru na délce D-řezu

Cílem při predikci dvojitého obráceného řezu bylo, aby protilehlé řezy byly pokud možno stejně dlouhé. Dvojitý obrácený řez byl tedy navrhován tak, že prvním řezem bylo dostaveno 50 % dostavované hodnoty a druhým obráceným řezem byl rezistor dostaven na nominální hodnotu. První řez byl umístěn  $800 \mu\text{m}$  od levé vodivé plošky. Pro dostavení hodnoty odporu rezistoru na 50 % dostavované hodnoty, bylo zapotřebí provést řez dlouhý  $390 \mu\text{m}$ . Druhý řez byl umístěn  $800 \mu\text{m}$  od prvního a veden z opačné strany kraje těla rezistoru než první řez. Pro dostavení nejbližší vyšší nominální hodnotě odporu rezistoru  $3 \text{ k}\Omega$  byl druhý řez veden  $380 \mu\text{m}$ , čímž byl odpor rezistoru dostaven na hodnotu  $3,01395 \text{ k}\Omega$ . Přesnost takto dostaveného odporu rezistoru dle simulačního programu byla  $0,47 \%$ .



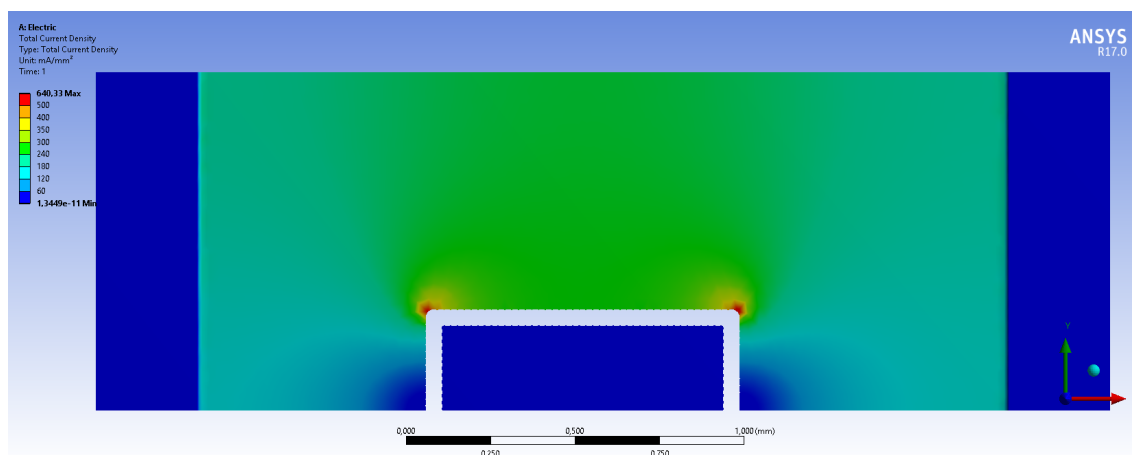
Obr. 6.12: Proudová hustota při dvojitém obráceném řezu

Jelikož oba řezy nebyli stejně dlouhé proudová hustota (resp. maximální výkonové zatížení) u každého řezu nebude úplně stejné. Ovšem vzhledem k rozdílu v délce pouze 10  $\mu\text{m}$  bude rozdíl v proudové hustotě u jednotlivých řezů zanedbatelný viz Obr. 6.12. Z hlediska maximálního výkonového zatížení se dá tento typ řezu srovnávat s I-řezem nebo D-řezem, což je způsobeno tím, že oba řezy byly provedeny celkem krátké. V praxi slouží tento typ řezu k dostavení odporu rezistoru s velkým rozdílem počáteční hodnoty od nominální, proto řezy musí být výrazně delší, čímž klesá i maximální výkonová zatížitelnost rezistoru. Tento typ řezu by bylo možné použít i jako topný rezistor, jelikož mezi oběma řezy vzniká oblast s větší proudovou hustou viz Obr. 6.12, tedy zde dochází k větším ztrátám ve formě tepla.



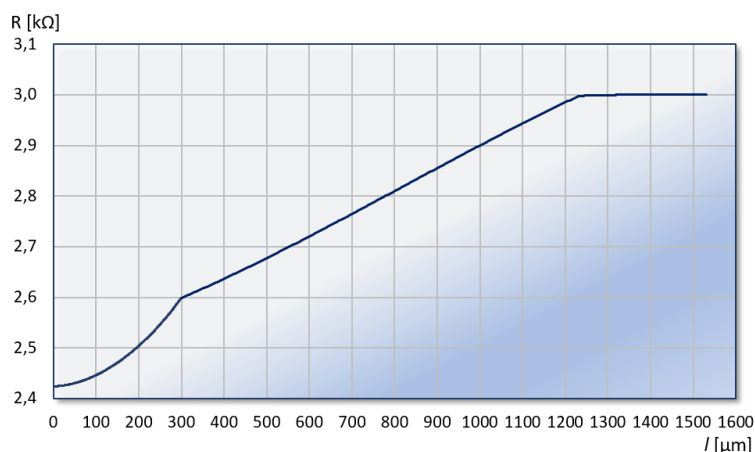
Obr. 6.13: Grafická závislost odporu rezistoru na délce dvojitého obráceného řezu

Při predikci U-řezu byl předpokládán L-řez, jehož první část řezu byla umístěna 700  $\mu\text{m}$  od vodivé plošky a otočný bod byl zvolen 30 %. Pro dostavení rezistoru první části L-řezu na 30 % dostavované hodnoty byl zapotřebý řez dlouhý 300  $\mu\text{m}$ . Druhá část L-řezu řezu byla volena experimentálně tak, aby uzavřením L-řezu byl odpor rezistoru dostaven na nominální hodnotu nejbližší vyšší 3 k $\Omega$ . Vzhledem k tomu byla druhá část řezu dlouhá 930  $\mu\text{m}$ . Poté byla spodní část odizolována řezem do U. Tímto řezem byl rezistor dostaven na hodnotu 3,00120 k $\Omega$ . Přesnost při dostavení U-řezem simulačním prgramem byla 0,04 %.



Obr. 6.14: Proudová hustota při U-řezu

Na Obr. 6.14, je zobrazena proudová hustota rezistorem, kde si lze všimnout, že odříznutá spodní část řezu byla izolována, čímž tento typ řezu bude vhodný především pro vysokonapěťové aplikace.



Obr. 6.15: Grafická závislost odporu rezistoru na délce L-řezu s dostavovacím řezem

## 6.4 Simulace vytvořených řezů zařízením AUREL

Aby bylo možné vyhodnocení s jakou přesností byly predikovány řezy simulačním programem ANSYS Workbench, byly vytvořeny programem Autodesk Inventor Professional 2017 totožné modely vytvořených rezistorů s řezy na substrátu. Nejprve byly změřeny délky jednotlivých dostavovacích řezů vytvořených zařízení AUREL ALS300. K měření byl použit mikroskop, který zobrazoval přibližnou oblast na monitoru počítače prostřednictvím programu, kde byly měřeny délky řezů při minimálním rozlišení  $5\text{ }\mu\text{m}$ .

Po změření délek vždy jednoho z řezů, byl v programu pro 3D návrhy vytvořen model totožného rezistoru na substrátu s řezem. Tento model rezistoru byl simulován programem ANSYS Workbench 17.0. Ze simulací byl zjištěn odpor rezistoru s provedeným řezem. Tyto odpory dostavených rezistorů byly zapsány do Tab. 6.1. V Tab. 6.1 byly následně vypočteny odchylky, s kterými byl zjištěn odpor simulací oproti měřenému reálnému odporu rezistoru. Z vypočtených odchylek je patrné, že s největší přesností je možné predikovat v simulačním programu ANSYS Workbench 17.0 jednoduchý I-řez resp. dvojitý obrácený řez (dva I-řezy proti sobě). Ovšem čím složitější řez např. L-řez s dostavovacím řezem, tím lze předpokládat menší přesnost predikce rezistorů simulačním programem.

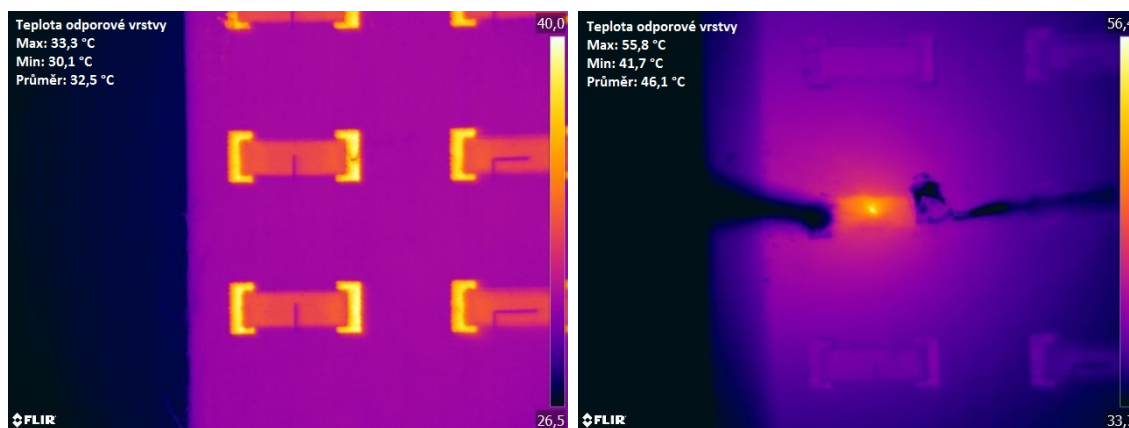
Tab. 6.1: Hodnoty odporů dostavovaných rezistorů získané měřeními a simulací

Typ řezu	$R_{mer-po\check{c}}$ [k $\Omega$ ]	$R_{mer-dostav}$ [k $\Omega$ ]	$R_{sim}$ [k $\Omega$ ]	odchylka [%]
I-řez	2,42173	3,03602	3,02224	0,45
L-řez	2,40736	3,01408	3,06805	1,79
L-řez s dostavovacím	2,47108	3,00757	3,10897	3,37
D-řez	2,38594	3,01647	3,10955	3,09
Dvojtý obrácený řez	2,40934	3,02531	3,03040	0,17
U-řez	2,42405	3,00956	2,96692	1,42

## 7 MĚŘENÍ TERMOVIZNÍ KAMEROU

Jelikož byly vytvořeny poměrně velké odpory rezistorů, které by bylo obtížné testovat z hlediska maximálního výkonového zatížení, byly rezistory měřeny termovizní kamerou FLIR SC660 při přiloženém maximální napětí na rezistoru 32 V. Termovizní kamerou FLIR SC660 bylo měřeno s přesností 1 % při rozlišení kamery  $25\text{ }\mu\text{m}$  a při nastavené emisivitě 0,96.

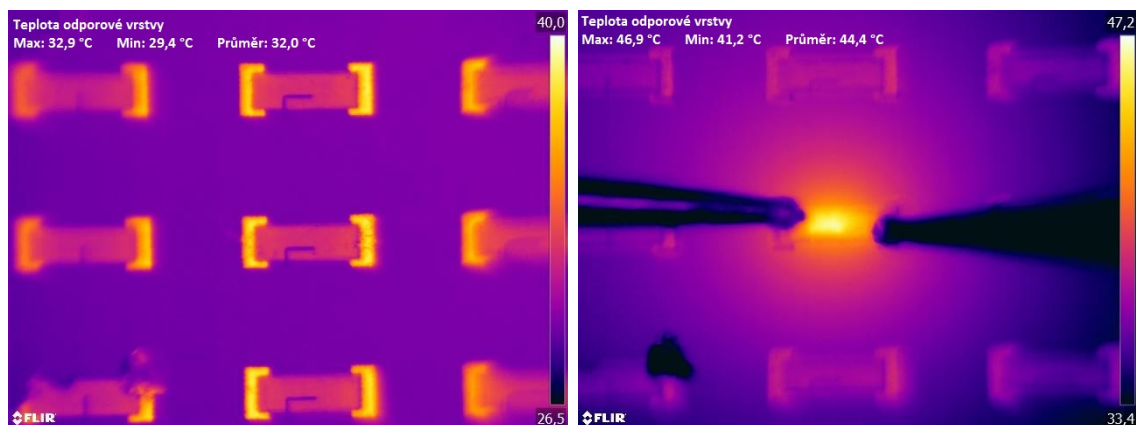
Aby byla termovizní kamera zaostřena musela být velmi blízko testovacímu substrátu. Proto bylo nejprve zvoleno řešení, kdy byly napájeny drátky na vodivé plošky rezistoru pro přivedení napětí ze zdroje. Jelikož při pájení docházelo k tzv. leachingu viz Obr. 7.1 (obrázek vpravo, na pravé vodivé plošce), měření byly prováděny při přiložených hrotech od zdroje napětí, což v některých případech bylo velmi obtížné. Měření byla prováděna vždy bez přiloženého napětí (obrázky vlevo) a při přiloženém napětí 32 V (obrázky vpravo).



Obr. 7.1: Povrchová teplota rezistoru s vytvořeným I-řezem

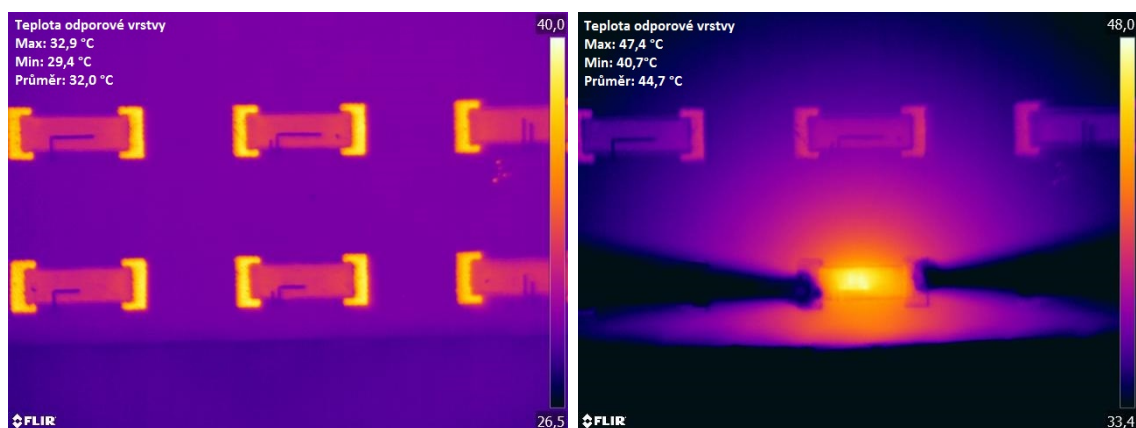
Pro měření termovizní kamerou rezistoru s I-řezem byl vybrán rezistor s počáteční hodnotou nejbližší  $2,4\text{ k}\Omega$ , aby bylo možné vyhodnocovat zatížení rezistorů s různými řezy navzájem. Počáteční hodnota (před dostavením) měřeného rezistoru tedy byla  $2,42173\text{ k}\Omega$ . Při přiloženém napětí viz Obr. 7.1 (vpravo), byly potvrzeny výsledky ze simulací, kdy největší proudová hustota, tedy i největší ztráty ve formě tepla, byly na konci I-řezu. Zde teplota dosahovala  $55,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , což bylo o  $14\text{ }^{\circ}\text{C}$  více než v odporové vrstvě na místě s nejmenší teplotou.

Pro měření rezistoru s L-řezem byl vybrán rezistor s počáteční hodnotou odporu rezistoru 2,40736 k $\Omega$ . Zde při přiloženém napětí na rezistor 32 V, byla nejvyšší teplota naměřena na konci L-řezu 46,9 °C viz Obr. 7.2 (vpravo). Vzhledem k naměření menší maximální teploty než u rezistoru s I-řezem, bude rezistor s L-řezem možné použít pro větší výkonové zatížení než rezistor s I-řezem. Na Obr. 7.2 (vpravo) si lze také všimnout, že právě nad oblastí L-řezu dochází k největším ztrátám ve formě tepla.



Obr. 7.2: Povrchová teplota rezistoru s vytvořeným L-řezem

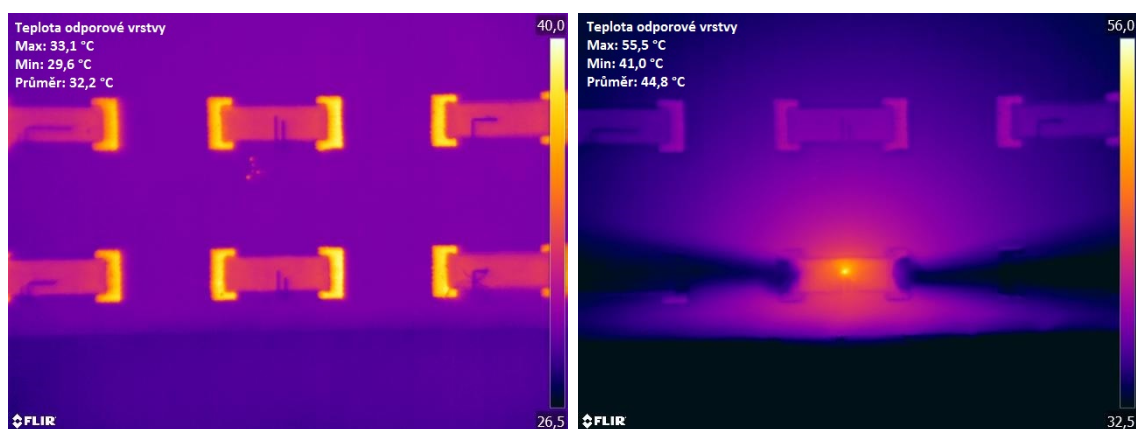
Dalším testovaným rezistorem byl L-řez s nastavovacím řezem, kdy byl vybrán rezistor právě s tímto řezem s počáteční hodnota odporu rezistoru 2,47108 k $\Omega$ . Zde byly výsledky z měření termovizní kamerou velmi podobné jako u L-řezu. Maximální teplota, která byla naměřena na konci L-řezu, zde dosahovala hodnoty 47,4 °C viz Obr. 7.3.



Obr. 7.3: Povrchová teplota rezistoru s vytvořeným L-řezem s nastavovacím řezem

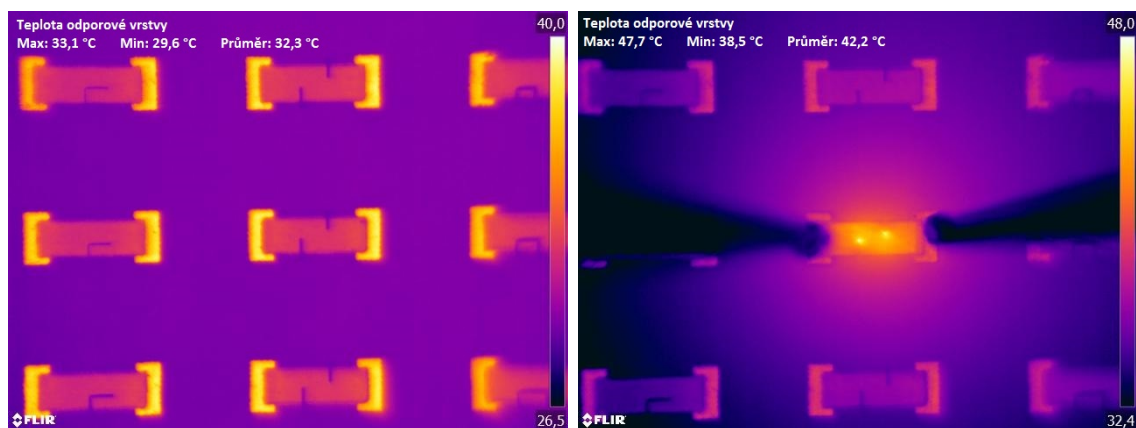


Pro měření rezistoru s D-řezem byl vybrán rezistor s počáteční hodnotou odporu rezistoru 2,40934 k $\Omega$ . Při měření termovizní kamerou u tohoto řezu byla nejvyšší teplota na konci delšího I-řezu 55,5 °C viz Obr. 7.4. Při srovnání s I-řezem viz Obr. 7.4, kdy byla maximální teplota 55,8 °C, bude maximální výkonové zatížení u D-řezu větší, jelikož musí být uvažována i počáteční hodnota, z které byl rezistor dostavován (I-řez 2,42173 k $\Omega$ , D-řez 2,38594 k $\Omega$ ). Jelikož čím větší bude rozdíl počáteční hodnoty odporu rezistoru od nominální hodnoty, tím větší bude muset být délka řezu, čímž bude menší maximální výkonové zatížení rezistoru.



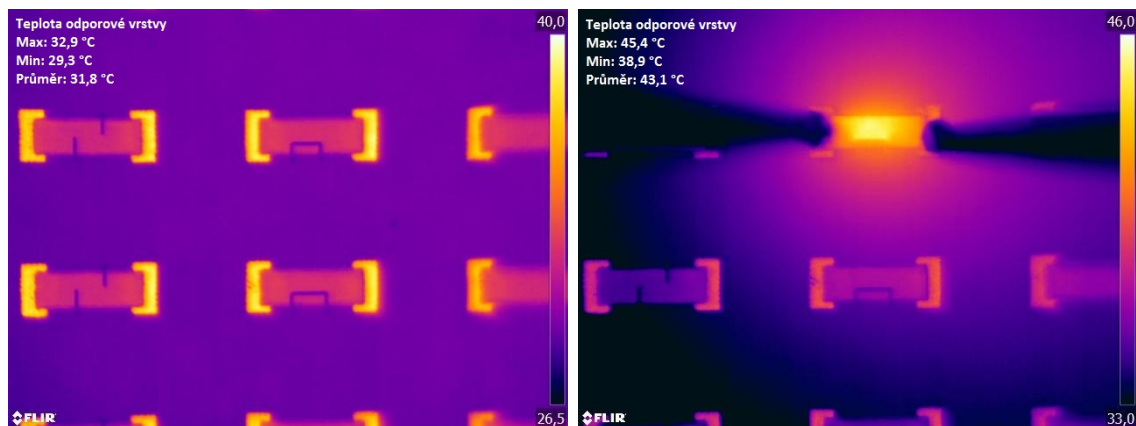
Obr. 7.4: Povrchová teplota rezistoru s vytvořeným D-řezem

Nejbližší počáteční hodnota odporu rezistoru 2,4 k $\Omega$  s vytvořeným dvojitým obráceným řezem byla 2,40934 k $\Omega$ . U tohoto řezu byla při přiloženém napětí 32 V naměřena termovizní kamerou maximální teplota 47,7 °C viz Obr. 7.5. Tato maximální teplota je srovnatelná s maximální teplotou rezistoru s L-řezem.



Obr. 7.5: Povrchová teplota rezistoru s vytvořeným dvojitým obráceným řezem

Na závěr byl termovizní kamerou měřen U-řez, kdy byl vybrán rezistor s počáteční hodnotou odporu 2,42405 k $\Omega$ . Maximální teplota byla termovizní kamerou naměřena nad spodní izolovanou částí 45,4 °C viz Obr. 7.6. Právě u tohoto rezistoru s U-řezem byla naměřena nejmenší maximální teplota, tedy lze předpokládat, že rezistor s tímto řezem by vydržel největší maximální výkonové zatížení.



Obr. 7.6: Povrchová teplota rezistoru s vytvořeným U-řezem

Pro přehlednost a porovnání naměřených teplot termovizní kamerou FLIR SC660 u jednotlivých nastavovacích řezů byla vytvořena Tabulka viz Tab. 7.1.

Tab. 7.1: Hodnoty teplot naměřené termovizní kamerou

Typ řezu	$R_{poč}$ [k $\Omega$ ]	$T_{max}$ [°C]	$T_{min}$ [°C]	$T_{prum}$ [°C]
I-řez	2,42173	55,8	41,7	46,1
L-řez	2,40736	46,9	41,2	44,4
L-řez s nastavovacím	2,47108	47,4	40,7	44,7
D-řez	2,38594	55,5	41,0	44,8
Dvojitý obrácený řez	2,40934	47,7	38,5	42,2
U-řez	2,42405	45,4	38,9	43,1

## 8 ZÁVĚR

Bakalářská práce byla zaměřena především na predikci dostavování tlustovrstvých rezistorů tzn. předpověď provedení délek řezů pro dostavení na nominální hodnotu odporu rezistoru a vhodnosti použití různých konfigurací řezů pro různé aplikace, především z výkonového hlediska.

V praktické části práce byl nejprve navrhnut tlustovrstvý rezistor. Poté byla navrhována testovací struktura substrátu s navrhovnými tlustovrstvými rezistory. Tato navrhovaná testovací struktura byla vytvořena na substrát z korundové keramiky, kdy pravděpodobně nastavením špatných parametrů síťotisku byly vypáleny rezistory s odporem třikrát větším, než měl mít navrhovaný rezistor. Tento problém byl vyřešen natisknutím druhé odporové vrstvy, kdy se hodnoty odporů rezistorů pohybovaly v rozmezí  $\pm 20 \%$  od navrhované hodnoty rezistoru. Tyto hodnoty odporů rezistorů již byli přijatelné pro dostavování rezistorů na nominální hodnotu odporu.

Dále byly vytvořené rezistory dostavovány zařízením AUREL ALS300 na nominální hodnotu 3 k $\Omega$ . Z dostavených hodnot odporů rezistorů byly vypočítány odchylky od nominální hodnoty odporu. Z těchto hodnot bylo zjištěno, že zařízením AUREL ALS300 bylo docíleno největší přesnosti dostavení odporu rezistoru na nominální hodnotu L-řezem s dostavovacím řezem s průměrnou přesností 0,20 %. Naopak nejmenší přesnosti dostavení na nominální hodnotu odporu rezistoru bylo docíleno I-řezem s průměrnou přesností 1,46 %.

V simulačním programu ANSYS Workbench, byli predikováni délky řezů. Pro vyhodnocování použití jednotlivých řezů, bylo použito v programu ANSYS Workbench výpočetní řešení Total Current Density. K zjištění přesnosti predikce řezů byly vytvořeny modely rezistorů s totožnými délkami řezů, které byly vytvořeny zařízením AUREL ALS300. Simulačním programem ANSYS Workbench byly zjištěny hodnoty odporů rezistorů, na kterou byly dostaveny v simulačním programu. Při stejných délkách řezů byly porovnány naměřené hodnoty při dostavování laserem AUREL ALS300 a zjištěné hodnoty simulačním programem ANSYS Workbench. Nejpresnější predikce simulačním programem bylo docíleno u jednoduchých I-řezů. Nejmenší přesnost predikce byla docíleno kombinací různých řezů (např. L-řezem s dostavovacím řezem).

Na závěr byly termovizní kamerou FLIR SC660 prakticky ověřeny poznatky ze simulací v ANSYS Workbench. Z naměřených hodnot termovizní kamerou byly vyhodnocovány použití různých konfigurací řezů pro různé aplikace. Z měření termovizní kamerou pro největší výkonové zatížení by byl vhodný U-řez nebo L-řez. Naopak nejméně vhodný by byl I-řez.

# LITERATURA

- [1] *Thick film technology. Engineering Training Courses - IDC* [online]. Silicon Valley: IDC Technologies, 2017 [cit. 27.5.2017]. Dostupné z: [http://www.idc-online.com/technical\\_references/pdfs/electronic\\_engineering/Thick\\_film\\_technology.pdf](http://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/electronic_engineering/Thick_film_technology.pdf)
- [2] BUJALOBOKOVÁ, Magdaléna a Pavel TRNKA. *Progresivní tlustovrstvé technologie v elektronických aplikacích*. ELEKTRO: odborný časopis pro elektrotechniku [online]. 2008, 2008(1), 6-7 [cit. 27.5.2017]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/36505.pdf>
- [3] *Hybridní integrované obvody, tenkovrstvé a tlustovrstvé technologie a jejich využití*. EPSO.WZ.CZ [online]. 2005 [cit. 27.5.2017]. Dostupné z: [http://epso.wz.cz/stahovani/sps/Technol\\_III-1tlus\\_a\\_tenk.pdf](http://epso.wz.cz/stahovani/sps/Technol_III-1tlus_a_tenk.pdf)
- [4] *DCB Ceramic PCB Design Guide: Thick Film Ceramic PCB Design Guide*. BEST Technology [online]. [cit. 27.5.2017]. Dostupné z: <http://www.bestpcbs.com/products/thick-film-ceramic-pcb-design-guide.htm>
- [5] *ELCERAM: Technologie: Technologie bílých substrátů*. ELCERAM [online]. Hradec Králové: ELCERAM, c2005-2012 [cit. 27.5.2017]. Dostupné z: <http://www.elceram.cz/cs/technologie-technologie-bilych-substratu.html>
- [6] *Aluminum Oxide. Accuratus* [online]. Phillipsburg: Accuratus, c2013 [cit. 27.5.2017]. Dostupné z: <http://accuratus.com/alumox.html>
- [7] *Tlusté vrstvy. ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY: Doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.* [online]. Brno: Ústav mikroelektroniky, c2004-2017 [cit. 27.5.2017]. Dostupné z: [http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/05a\\_tluste\\_vrstvy.pdf](http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/05a_tluste_vrstvy.pdf)
- [8] *Thick Film Printing. DunAn SENSING* [online]. San Jose: DunAn Sensing, c2017 [cit. 27.5.2017]. Dostupné z: <http://www.dunansensing.com/thick-film-printing/>
- [9] *Three Roll Mills and Thick Film Paste: Functional ingredients*. TORREY HILLS TECHNOLOGIE [online]. San Diego: TORREY HILLS TECHNOLOGIES [cit. 27.5.2017]. Dostupné z: [http://www.threerollmill.com/documents/thick\\_film\\_paste.pdf](http://www.threerollmill.com/documents/thick_film_paste.pdf)
- [10] *Sítotiskové rámy a síťovina. Svět tisku* [online]. Úvaly: Svět tisku, c2004 [cit. 27.5.2017]. Dostupné z: [http://www.svettisku.cz/buxus/generate\\_page.php?page\\_id=1717&buxus\\_svettisku=f3f3](http://www.svettisku.cz/buxus/generate_page.php?page_id=1717&buxus_svettisku=f3f3)

- [11] *Popis smt. SEMACH - výroba plošných spojů* [online]. Valašské Meziříčí: SEMACH, c2008-2017 [cit. 27. 5. 2017]. Dostupné z: [http://www.semach.cz/pdf/popis\\_smt.pdf](http://www.semach.cz/pdf/popis_smt.pdf)
- [12] *Virtuální laboratoř - Depozice materiálů šablonovým tiskem. In: ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY* [online]. Brno: Ústav mikroelektroniky, c2004-2017 [cit. 27. 5. 2017]. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/~vasko/virtualni-laborator/sablonovy-tisk/technologie/>
- [13] *Manuální digitální dispenzer FISNAR SL101N. In: P2J Technology* [online]. Dašice: P2J Technology, c2014 [cit. 27. 5. 2017]. Dostupné z: <http://www.p2jtechnology.cz/produkty/smt-montaz/davkovace-pajeci-pasty-a-lepidla/digitalni-davkovac-sl101n/>
- [14] *Aerosol Jet Printing aneb když tranzistor prochází tryskou. Vyvoj.HW.cz - Vše o elektronice a programování* [online]. Praha: HW server, 2015 [cit. 27. 5. 2017]. Dostupné z: <http://vyvoj.hw.cz/trendy/aerosol-jet-printing-aneb-kdyz-tranzistor-prochazi-tryskou.html>
- [15] ADÁMEK, PH.D., Ing. Martin, Ing. Edita HEJÁTKOVÁ, Ing. Alexandr OTÁHAL a Ing. Michal ŘEZNÍČEK, PH.D. *MIKROELEKTRONIKA A TECHNOLOGIE SOUČÁSTEK: LABORATORNÍ CVIČENÍ - DOSTAVOVÁNÍ A MĚŘENÍ TLV ODPORŮ*. Brno: Ústav mikroelektroniky, 2016. VUT Brno - FEKT.
- [16] DYSON, A. F. a A. J. CABLE. *LASER TRIMMING OF THICK FILM RESISTORS. Electrocomponent Science and Technology*. Great Britain: Gordon and Breach Science Publishers, 1974, 1974(1), 51-57.
- [17] *Using Laser Trimmable Resistors. VISHAY* [online]. Malvern: VISHAY INTERTECHNOLOGY, 2013 [cit. 27. 5. 2017]. Dostupné z: <http://www.vishay.com/docs/28893/usinglasertrimmableresistors.pdf>
- [18] *Ohmical trimming laser AUREL ALS300. ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY* [online]. Brno: LabSensNano, c2004-2017 [cit. 27. 5. 2017]. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/LabSensNano/Facilities.aspx?id=12>
- [19] LENK, Dipl.Phys.Peter. *Laser trimming fast and reliable*
- [20] CONRADT, RIC a LYNNE S. MARCUS. *THICK-FILM LASER TRIMMING PRINCIPLES, TECHNIQUES AND RECOMMENDATIONS. Electrocomponent Science and Technology*. Great Britain: Gordon and Breach Science Publishers, 1981, (9), 9-14.

- [21] *Laser Trimming Specifications. In: Advanced substrate: Design and Manufacturing* [online]. c2010 [cit. 27.5.2017]. Dostupné z: <http://www.advancedsubstrate.com/Lasertrimmingspecs.pdf>
- [22] SANDBORN, Phillip a Peter SANDBORN. *A RANDOM TRIMMING APPROACH FOR OBTAINING HIGH-PRECISION EMBEDDED RESISTORS*. 2008, 1-8.
- [23] *Thick-film Printing Design Guidelines: Thick-film Printing Design Guidelines. In: Advanced substrate: Design and Manufacturing* [online]. c2010 [cit. 27.5.2017]. Dostupné z: <http://www.advancedsubstrate.com/Thickfilmdesignspec.pdf>
- [24] *INTEGRA SERIES - KEITHLEY. Adler* [online]. [cit. 27.5.2017]. Dostupné z: [http://www.adler-instrumentos.es/imagenes\\_web/productos/3-Integra\\_Series\\_DS.pdf](http://www.adler-instrumentos.es/imagenes_web/productos/3-Integra_Series_DS.pdf)
- [25] *CERMET SILVER CONDUCTOR 9912-A. ElectroScience - Thick-Film Materials and Ceramic Tapes* [online]. King of Prussia: ESL ElectroScience, c2016 [cit. 27.5.2017]. Dostupné z: <http://electroscience.com/sites/default/files/datasheets/9912-A.pdf>

## SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

TLV	Tlustovrstvá
TNV	Tenkovrstvá
TCR	Teplotní koeficient odporu – Temperature Coefficient of Resistance
SMD	Součástka pro povrchovou montáž – Surfaced Mounted Device
HIO	Hybridní integrovaný obvod
YAG:Nd	Yttrium Aluminium Garnet:Neodymium

# SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	TLV technologie [1]	10
1.2	Základní parametry síťoviny [7]	12
1.3	Princip síťotisku [7]	13
1.4	Princip šablonového tisku [12]	14
1.5	Zařízení pro dispenzní tisk [13]	14
1.6	Princip funkce tisku proudu aerosolu [14]	15
2.1	Odpor na čtverec: a) $R = 10 \Omega$ b) $R = 20 \Omega$ c) $R = 5 \Omega$	16
2.2	Dostavování odporu rezistoru pomocí proudu abrazivních částic [1]	17
2.3	Dostavování pomocí laseru [1]	18
2.4	Základní parametry laseru s různým překrytím [17]	19
2.5	Zařízení AUREL ALS300	20
2.6	Řez I	21
2.7	Řez L	22
2.8	Řez D	23
2.9	Řez L s dostavovacím řezem	23
2.10	Řez M	24
2.11	Dvojitý obrácený řez	24
2.12	Dvojitý obrácený řez L	25
2.13	Řez U	25
2.14	Holý řez	26
2.15	Náhodné řezy	27
3.1	Rozměry TLV rezistoru v milimetrech	29
4.1	Filmová předloha pro vodivou pastu (vlevo) a odporovou pastu (vpravo)	31
4.2	Detail síta s vytvořeným motivem pod mikroskopem JENAVERT	32
4.3	Použité pasty pro síťotisk	33
4.4	Vypálený rezistor po tisku druhé vrstvy odporové pasty	34
4.5	Sloupcový graf průměrných hodnot odporu rezistoru v sloupci	35
5.1	Program PROTOMAT využívající zařízení AUREL ALS300	36
5.2	Editor pro nastavení parametrů řezu a laseru	37
5.3	I-řez vytvořený zařízením AUREL ALS300	38
5.4	L-řez vytvořený zařízením AUREL ALS300	40
5.5	L-řez s dostavovacím řezem vytvořený zařízením AUREL ALS300	41
5.6	D-řez vytvořený zařízením AUREL ALS300	42
5.7	Dvojitý obrácený řez vytvořený zařízením AUREL ALS300	43
5.8	U-řez vytvořený zařízením AUREL ALS300	45
6.1	3D model navrhovaného resistoru	47
6.2	Detail odporové vrstvy a substrátu zobrazen mikroskopem ZEISS	48



6.3	Mesh modelu TLV rezistoru s L-řezem s nastavovacím řezem . . . . .	50
6.4	Proudová hustota při I-řezu . . . . .	51
6.5	Grafická závislost odporu rezistoru na délce provedeného I-řezu . . . .	51
6.6	Proudová hustota při L-řezu . . . . .	52
6.7	Grafická závislost odporu rezistoru na délce provedeného L-řezu . . . .	52
6.8	Proudová hustota při L-řezu s nastavovacím řezem . . . . .	53
6.9	Grafická závislost odporu rezistoru na délce L-řezu s nastavovacím řezem . . . . .	54
6.10	Proudová hustota při D-řezu . . . . .	54
6.11	Grafická závislost odporu rezistoru na délce D-řezu . . . . .	55
6.12	Proudová hustota při dvojitým obráceném řezu . . . . .	56
6.13	Grafická závislost odporu rezistoru na délce dvojitého obráceného řezu	56
6.14	Proudová hustota při U-řezu . . . . .	57
6.15	Grafická závislost odporu rezistoru na délce L-řezu s nastavovacím řezem . . . . .	57
7.1	Povrchová teplota rezistoru s vytvořeným I-řezem . . . . .	59
7.2	Povrchová teplota rezistoru s vytvořeným L-řezem . . . . .	60
7.3	Povrchová teplota rezistoru s vytvořeným L-řezem s nastavovacím řezem . . . . .	60
7.4	Povrchová teplota rezistoru s vytvořeným D-řezem . . . . .	61
7.5	Povrchová teplota rezistoru s vytvořeným dvojitým obráceným řezem	61
7.6	Povrchová teplota rezistoru s vytvořeným U-řezem . . . . .	62

## SEZNAM TABULEK

5.1	Hodnoty při dostavování odporu rezistoru I-řezem . . . . .	39
5.2	Hodnoty při dostavování odporu rezistoru L-řezem . . . . .	40
5.3	Hodnoty při dostavování odporu rezistoru L-řezem s dostavovacím řezem . . . . .	41
5.4	Hodnoty při dostavování odporu rezistoru D-řezem . . . . .	42
5.5	Hodnoty při dostavování odporu rezistoru dvojitým obráceným řezem	44
5.6	Hodnoty při dostavování odporu rezistoru U-řezem . . . . .	45
6.1	Hodnoty odporů dostavovaných rezistorů získané měření a simulací	58
7.1	Hodnoty teplot naměřené termovizní kamerou . . . . .	62